



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

## FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

## ÚSTAV VÝKONOVÉ ELEKTROTECHNIKY A ELEKTRONIKY

DEPARTMENT OF POWER ELECTRICAL AND ELECTRONIC ENGINEERING

## STEJNOSMĚRNÉ MOTOR KY PRO OBECNOU POTŘEBU

DC MOTORS FOR GENERAL PURPOSES.

### BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

### AUTOR PRÁCE

AUTHOR

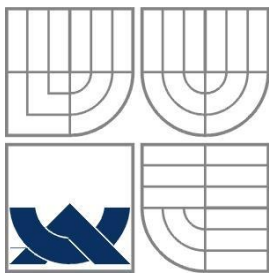
Daniel Randa

### VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

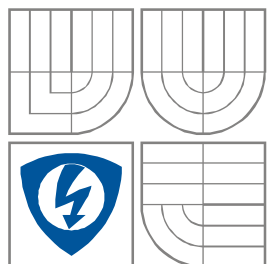
prof. Ing. Vítězslav Hájek, CSc.

BRNO 2016



**VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ**

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



**FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A  
KOMUNIKAČNÍCH  
TECHNOLOGIÍ**

**ÚSTAV VÝKONOVÉ ELEKTROTECHNIKY  
A ELEKTRONIKY**

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION  
DEPARTMENT OF POWER ELECTRICAL AND ELECTRONIC  
ENGINEERING

## **Stejnoseměrné motorky pro obecnou potřebu**

**DC MOTORS FOR GENERAL PURPOSES**

**BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

BACHELOR'S THESIS

**AUTOR PRÁCE**

AUTHOR

Daniel Randa

**VEDOUCÍ PRÁCE**

SUPERVISOR

prof. Ing. Vítězslav Hájek, CSc.

BRNO, 2016



# Bakalářská práce

bakalářský studijní obor **Silnoproudá elektrotechnika a elektroenergetika**

Ústav výkonové elektrotechniky a elektroniky

**Student:** Daniel Randa

**ID:** 161794

**Ročník:** 3

**Akademický rok:** 2015/16

## NÁZEV TÉMATU:

### Stejnoseměrné motorky pro obecnou potřebu

## POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

1. Zhodnoťte výsledky semestrálního projektu, pokud jde o používané stejnosměrné motorky malého výkonu
2. Proveďte rozbor jednoho zvoleného typu vyráběných strojů
3. Navrhněte možnosti inovace a ověřte výpočtem případně, podle možností, měření na vzorku.

## DOPORUČENÁ LITERATURA:

- [1] Koziej E., Mazsyny elektryczne pojazdów samochodowych. WNT Warszawa, 1984, ISBN 83-204-0515-7
- [2] Yeadon H., Handbook of Small Electric Motors, Mc Graw Hill Book Company, 2001, ISBN 0-07-072332-X
- [3] T. Denton, Automobile Electrical and Electronics Systems Butterworth-Heinemann, Oxford 2001 ISBN 0-34-73195-8

**Termín zadání:** 21.9.2015

**Termín odevzdání:** 18.8.2016

**Vedoucí práce:** prof. Ing. Vítězslav Hájek, CSc.

**Konzultant bakalářské práce:**

**doc. Ing. Petr Toman, Ph.D., předseda oborové rady**

## UPOZORNĚNÍ:

Autor bakalářské práce nesmí při vytváření bakalářské práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

## **Abstrakt**

Tato práce se zabývá inovací stejnosměrného motorku s permanentními magnety malého výkonu. Práce je rozdělena do tří úkolů. Jako první částí je provést přehled sériově vyráběných stejnosměrných motorků. Druhou částí je vybrat jeden konkrétní stejnosměrný motorek z vypracovaného přehledu a provést jeho rozbor a podrobný popis. V poslední části práce je navržení inovací na vybraném stejnosměrném motorku.

## **Abstract**

This work deals with innovation DC permanent magnet motor for low power. The work is divided into three tasks. The first part is to survey serially produced DC motors. The second part is to choose one particular DC motor drawn from the survey and carry out its analysis and detailed description. The last part is to design innovations to selected DC motor.

### **Klíčová slova**

Stejnoseměrný motor, permanentní magnety, kotva, stator, rotorové plechy, komutátor, kartáče.

### **Keywords**

DC motor, permanent magnets, rotor, stator, rotor sheets, commutator, brushes.

## **Bibliografická citace**

RANDA, D. *Stejnoseměrné motorky pro obecnou potřebu*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2016. 46 s. Vedoucí bakalářské práce prof. Ing. Vítězslav Hájek, CSc..

## Prohlášení

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci na téma Stejnoseměrné motorky pro obecnou potřebu jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této bakalářské práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení § 152 trestního zákona č. 140/1961 Sb.

V Brně dne .....

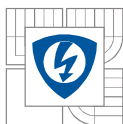
Podpis autora .....

## Poděkování

Děkuji vedoucímu bakalářské práce prof. Ing. Vítězslavu Hájkovi, CSc. za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé bakalářské práce.

V Brně dne .....

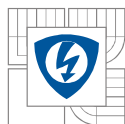
Podpis autora .....



## Obsah

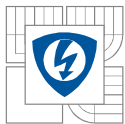
|  |           |
|--|-----------|
| <b>1 ÚVOD .....</b>  | <b>12</b> |
| <b>2 VÝBĚR POUŽÍVANÝCH STEJNOSMĚRNÝCH MOTORKŮ .....</b>  | <b>13</b> |
| 2.1 STEJNOSMĚRNÝ MOTOREK P2TV, ATAS ELEKTROMOTORY NÁCHOD A. S. ČESKÁ REPUBLIKA .....               | 13        |
| 2.2 STEJNOSMĚRNÝ MOTOREK 1.13.044.236, BÜHLER MOTOR GMBH NĚMECKO .....                             | 14        |
| 2.3 STEJNOSMĚRNÝ MOTOREK GNM 4175A, ENGEL ELEKTROMOTOREN GMBH NĚMECKO.....                         | 14        |
| 2.4 STEJNOSMĚRNÝ MOTOREK GR 80x40, DUNKERMOTOREN GMBH NĚMECKO .....                                | 15        |
| 2.5 STEJNOSMĚRNÝ MOTOREK CPB, BOSCH GMBH NĚMECKO .....   | 15        |
| <b>3 VYHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ SEMESTRÁLNÍ PRÁCE .....</b>  | <b>16</b> |
| 3.1 POROVNÁNÍ VYBRANÝCH STEJNOSMĚRNÝCH MOTORKŮ MALÉHO VÝKONU .....                                 | 16        |
| <b>4 ZÁKLADNÍ PROVOZY A TYPY KRYTÍ STEJNOSMĚRNÝCH MOTORKŮ .....</b>                                | <b>23</b> |
| 4.1 ZNAČENÍ A POPIS PROVOZŮ ELEKTRICKÝCH STROJŮ .....  | 23        |
| 4.2 KRYTÍ STEJNOSMĚRNÝCH MOTORKŮ .....   | 24        |
| <b>5 ROZBOR STEJNOSMĚRNÉHO MOTORKU P2TV, ATAS ELEKTROMOTORY NÁCHOD A. S. ČESKÁ REPUBLIKA .....</b> | <b>26</b> |
| <b>6 OBECNÉ MOŽNOSTI INOVACÍ STEJNOSMĚRNÝCH MOTORKŮ .....</b>                                      | <b>29</b> |
| 6.1 KOSTRA MOTORKU .....   | 29        |
| 6.2 PERMANENTNÍ MAGNETY .....  | 30        |
| 6.3 ROTOROVÉ PLECHY .....  | 31        |
| 6.4 KOMUTÁTOR .....  | 31        |
| <b>7 VÝPOČTY V ANSOFT MAXWELL.....</b>   | <b>32</b> |
| 7.1 PROSTŘEDÍ RMXprt .....   | 32        |
| 7.2 ÚPRAVA NA M270 – 35A .....   | 33        |
| 7.3 ZVÝŠENÍ ČINITELE PLNĚNÍ ROTOROVÉ DRÁŽKY .....  | 33        |
| 7.4 PERMANENTNÍ MAGNETY NdFeB30.....   | 33        |
| 7.5 PERMANENTNÍ MAGNETY NdFeB30 A VODIČ 0,8 MM .....   | 34        |
| 7.6 PERMANENTNÍ MAGNETY NdFeB30, VODIČ 0,8 MM A M270 – 35A .....                                   | 34        |
| 7.7 SHRUTÍ ÚPRAV .....   | 39        |
| <b>8 ZÁVĚR.....</b>  | <b>40</b> |
| <b>LITERATURA .....</b>  | <b>42</b> |
| <b>PŘÍLOHY .....</b>   | <b>44</b> |





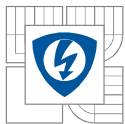
## SEZNAM OBRÁZKŮ

|   |           |
|---|-----------|
| <i>Obrázek 1 Stejnoseměrný motorek typ P2TV [1] .....</i>   | <i>13</i> |
| <i>Obrázek 2 Stejnoseměrný motorek od výrobce Bühler a Engel [2], [3] .....</i>   | <i>14</i> |
| <i>Obrázek 3 Stejnoseměrný motorek od výrobce dunkermotoren a Bosch [4], [5] .....</i>  | <i>15</i> |
| <i>Obrázek 4 Srovnání jmenovitých proudů vybraných stejnosměrných motorků .....</i>   | <i>17</i> |
| <i>Obrázek 5 Srovnání jmenovitých otáček vybraných stejnosměrných motorků .....</i>   | <i>18</i> |
| <i>Obrázek 6 Srovnání jmenovitých výkonů vybraných stejnosměrných motorků.....</i>  | <i>19</i> |
| <i>Obrázek 7 Srovnání účinností vybraných stejnosměrných motorků .....</i>  | <i>20</i> |
| <i>Obrázek 8 Vyjádření podílu jmenovitého momentu a hmotnosti motorku .....</i>   | <i>21</i> |
| <i>Obrázek 9 Vyjádření poměru jmenovitého výkonu, účinnosti na hmotnosti vybraných<br/>stejnoseměrných motorků.....</i>                                     | <i>22</i> |
| <i>Obrázek 10 Stejnoseměrný motorek typ P2TV.....</i>   | <i>26</i> |
| <i>Obrázek 11 Náčrtek motorku P2TV z dokumentace výrobce [1] .....</i>  | <i>27</i> |
| <i>Obrázek 12 Model stejnosměrného motorku P2TV utvořeného v Ansoft Maxwell RMxpert.....</i>  | <i>28</i> |
| <i>Obrázek 13 Náčrtek celého rotoru i s hřídelí a výřez rotorové drážky [8] .....</i>   | <i>28</i> |
| <i>Obrázek 14 Přesné bezešvé trubky [6] .....</i>   | <i>29</i> |
| <i>Obrázek 15 Demagnetizační křivky pro různé typy magnetů [17] .....</i>   | <i>30</i> |
| <i>Obrázek 16 Permanentní magnety z materiálu NdFeB a SmCo [7], [9] .....</i>   | <i>30</i> |
| <i>Obrázek 17 Porovnání několika typů elektrických ocelí [15] .....</i>   | <i>31</i> |
| <i>Obrázek 18 Snímek obrazovky při práci v prostředí RMxpert [18] .....</i>   | <i>32</i> |
| <i>Obrázek 19 Model původního stejnosměrného motorku Atas P2TV v RMxpert a upravený motorek<br/>s permanentními magnety ze vzácných zemin NdFeB30 .....</i> | <i>34</i> |
| <i>Obrázek 20 Zobrazení proudových charakteristik a jejich porovnání z RMxpert .....</i>  | <i>35</i> |
| <i>Obrázek 21 Otáčkové charakteristiky jednotlivých úprav stejnosměrného motorku .....</i>  | <i>36</i> |
| <i>Obrázek 22 Výkonové charakteristiky úprav motorku .....</i>  | <i>37</i> |
| <i>Obrázek 23 Srovnání jednotlivých účinností při úpravách stejnosměrného motorku.....</i>  | <i>38</i> |



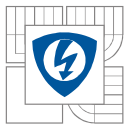
## SEZNAM TABULEK

|  |           |
|--|-----------|
| <i>Tabulka 1 Parametry stejnosměrného motorku P2TV z dokumentace výrobce [1] .....</i>         | <i>13</i> |
| <i>Tabulka 2 Parametry stejnosměrného motorku 1.13.044.236 z dokumentace výrobce [2] .....</i> | <i>14</i> |
| <i>Tabulka 3 Parametry stejnosměrného motorku GNM 4175A z dokumentace výrobce [3] .....</i>    | <i>14</i> |
| <i>Tabulka 4 Parametry stejnosměrného motorku GR 80x40 z dokumentace výrobce [4] .....</i>     | <i>15</i> |
| <i>Tabulka 5 Parametry stejnosměrného motorku CPB z dokumentace výrobce [5] .....</i>          | <i>15</i> |
| <i>Tabulka 6 Porovnávací tabulka parametrů vybraných stejnosměrných motorků .....</i>          | <i>16</i> |
| <i>Tabulka 7 Typy provozů stejnosměrných motorků [11] .....</i>                                | <i>23</i> |
| <i>Tabulka 8 Popis první vyskytující se prvních číslic IP kódu a jejich význam [12] .....</i>  | <i>25</i> |
| <i>Tabulka 9 Popis druhé číslice obsažené v IP kódu a jejich význam [12] .....</i>             | <i>25</i> |
| <i>Tabulka 10 Přehled parametrů naprázdno u jednotlivých úprav .....</i>                       | <i>39</i> |
| <i>Tabulka 11 Přehled parametrů nakrátko u jednotlivých úprav .....</i>                        | <i>39</i> |
| <i>Tabulka 12 Přehled parametrů na jmenovité hodnotě .....</i>                                 | <i>39</i> |



## SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK

|               |                                  |                      |
|---------------|----------------------------------|----------------------|
| $U$           | Napětí                           | [V]                  |
| $I$           | Proud                            | [A]                  |
| $M_N$         | Jmenovitý moment motoru          | [Nm]                 |
| $n_N$         | Jmenovité otáčky motoru          | [min <sup>-1</sup> ] |
| $m$           | Hmotnost                         | [kg]                 |
| $P_2$         | Výkon motoru                     | [W]                  |
| $\eta$        | Účinnost motoru                  | [-]                  |
| DC            | Stejnoseměrný motor              |                      |
| $\vartheta$   | Provozní teplota motoru          | [°C, K]              |
| NdFeB         | Neodym – Železo – Bor            |                      |
| SmCo          | Samarium – Kobalt                |                      |
| $U_N$         | Jmenovité napětí                 | [V]                  |
| $I_N$         | Jmenovitý proud                  | [A]                  |
| $U_i$         | Indukované napětí                | [V]                  |
| $R$           | Odpor                            | [Ω]                  |
| $B$           | Magnetická indukce               | [T]                  |
| $\varnothing$ | Průměr                           | [mm]                 |
| $r$           | Poloměr                          | [mm]                 |
| $l$           | Délka                            | [mm]                 |
| $\Delta P_e$  | Ztráty ve vinutí                 | [W]                  |
| $R_a$         | Celkový odpor kotvy              | [Ω]                  |
| $l_{va}$      | Střední délka vodiče             | [m]                  |
| $l_\delta$    | Délka čela                       | [m]                  |
| $\tau_p$      | Pólová rozteč                    | [m]                  |
| $N_s$         | Počet vodičů v sérii             |                      |
| $S_{va}$      | Průřez vodiče                    | [mm <sup>2</sup> ]   |
| $\Delta P_k$  | Ztráty na kartáčích a komutátoru | [W]                  |
| $P_h$         | Hysterezní ztráty                | [W/kg]               |
| $f$           | Frekvence                        | [Hz]                 |
| $P_v$         | Ztráty vířivými proudy           | [W/kg]               |



|              |                                   |                      |
|--------------|-----------------------------------|----------------------|
| $P_{Fe}$     | Celkové ztráty v železe           | [W]                  |
| $\rho$       | Měrná hmotnost (hustota)          | [kg/m <sup>3</sup> ] |
| $V_{celk}$   | Výsledný objem                    | [m <sup>3</sup> ]    |
| $V_{dr}$     | Objem drážky                      | [m <sup>3</sup> ]    |
| $V$          | Objem kotvy                       | [m <sup>3</sup> ]    |
| $\Delta P_t$ | Ztráty třením kartáčů o komutátor |                      |
| $v_k$        | Obvodová rychlost                 | [m/s]                |
| $S_k$        | Plocha kartáče                    | [mm <sup>2</sup> ]   |



## 1 ÚVOD

Stejnoseměrné stroje jsou nejstarší točivé elektrické stroje vůbec. Jejich principy známe již řadu let a od té doby prošly značným vývojem, aby se zlepšily jejich elektrické a mechanické vlastnosti. V dnešní době už spíše využíváme pouze stejnosměrné motory, tedy přeměnu elektrické energie na mechanickou, protože dynama by pro výrobu elektrické energie nevyhovovala.

Určitou výhodou je, že jsou oproti střídavým strojům stejných výkonů menších rozměrů, a proto mají i menší hmotnost. Další výhodou u stejnosměrných motorů je jejich velký záběrný moment a malá časová konstanta. Stejnoseměrné stroje také mají lineární mechanické charakteristiky a regulační charakteristiky.

Cílem této bakalářské práce bylo vytvoření přehledu sériově vyráběných stejnosměrných motorků s permanentními magnety malého výkonu a vyhodnocení výsledků vypracovaného přehledu. Dalším úkolem bylo z vytvořeného přehledu stejnosměrných motorků vybrat jeden k podrobnému rozboru a analýze a následné provedení výpočtů, navrzení případných možností inovací a případné provedení měření na vybraném stejnosměrném motorku malého výkonu. Navržené inovace byly testovány a propočteny pomocí programu Ansoft Maxwell v němž byl vytvořen projekt v RMxpert.

[10]

## 2 VÝBĚR POUŽÍVANÝCH STEJNOSMĚRNÝCH MOTORKŮ

Jedná se o první bod zadání a byl zde zpracován přehled obecně používaných stejnosměrných motorků s permanentními magnety. Jedná se o stejnosměrné motorky malého výkonu. Přehled stejnosměrných motorků byl vypracován s ohledem na velikost napájecího napětí 24 V a velikostí jmenovitého výkonu do 200 W. V úvahu při zpracování přehledu byl i způsob jejich provozu S1 nebo-li kontinuální provoz a typ krytí stejnosměrného motoru musel být v označení pro uzavřený stejnosměrný motorek. Stejnosměrné motorky malého výkonu se používají např. v automobilech, elektrických přístrojích, domácích spotřebičích nebo, i v hračkách.

### 2.1 Stejnosměrný motorek P2TV, ATAS elektromotory Náchod a. s. Česká Republika

Jde o stejnosměrný motorek Českého výrobce ATAS Náchod. Stejnosměrný motorek má vnější průměr 81 mm, typ provozu je S1. Stejnosměrný motorek tedy pracuje v nepřetržitém provozu, není tedy třeba dělat přestávky mezi provozu. Dále má motorek krytí IP42. Stejnosměrný motorek je uzavřený. [1]

Tabulka 1 Parametry stejnosměrného motoru P2TV z dokumentace výrobce [1]

| Výrobce | Napětí [V] | Proud [A] | Výkon [W] | Jmenovitý moment [N·cm] | Otáčky [min <sup>-1</sup> ] | Hmotnost [kg] |
|---------|------------|-----------|-----------|-------------------------|-----------------------------|---------------|
| Atas    | 24         | 5         | 80        | 38,2                    | 2 000                       | 3,3           |



Obrázek 1 Stejnosměrný motorek typ P2TV [1]

## 2.2 Stejnosměrný motorek 1.13.044.236, Bühler motor GmbH Německo

Stejnosměrný motorek je vyrobený německou firmou Bühler. Má vnější průměr 51,6 mm a celkovou délku 88,6 mm. Stejnosměrný motorek je proveden v uzavřeném krytí IP 40 a pracuje při teplotách okolního prostředí od  $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$  ~  $+70\text{ }^{\circ}\text{C}$ . [2]

Tabulka 2 Parametry stejnosměrného motorku 1.13.044.236 z dokumentace výrobce [2]

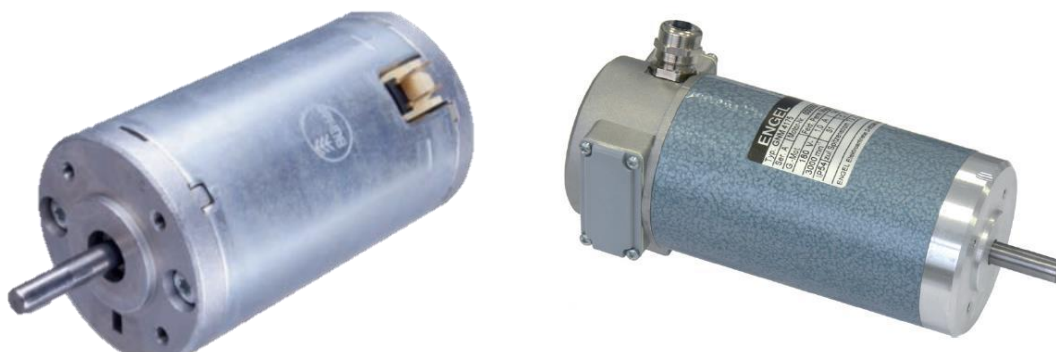
| Výrobce | Napětí [V] | Proud [A] | Výkon [W] | Jmenovitý moment [N·cm] | Otáčky [ $\text{min}^{-1}$ ] | Hmotnost [kg] |
|---------|------------|-----------|-----------|-------------------------|------------------------------|---------------|
| Bühler  | 24         | 3,1       | 50        | 15                      | 3 200                        | 0,765         |

## 2.3 Stejnosměrný motorek GNM 4175A, Engel elektromotoren GmbH Německo

Tento stejnosměrný motorek je vyrobený německou firmou Engel elektromotoren má vnější průměr 70 mm a celkovou délku 198 mm bez brzdy, kterou výrobce na objednání přidělá a pak má motorek o dalších 46 mm navíc. Pracuje v pohonném provozu S1, v nepřetržitém provozu. Stejnosměrný motorek je proveden jako uzavřený, krytí IP54. [3]

Tabulka 3 Parametry stejnosměrného motorku GNM 4175A z dokumentace výrobce [3]

| Výrobce | Napětí [V] | Proud [A] | Výkon [W] | Jmenovitý moment [N·cm] | Otáčky [ $\text{min}^{-1}$ ] | Hmotnost [kg] |
|---------|------------|-----------|-----------|-------------------------|------------------------------|---------------|
| Engel   | 24         | 7,5       | 140       | 44,6                    | 3 000                        | 2,65          |



Obrázek 2 Stejnosměrný motorek od výrobce Bühler a Engel

[2], [3]

## 2.4 Stejnosměrný motorek GR 80x40, dunkermotoren GmbH Německo

Stejnosměrný motorek vyrobený německou firmou dunkermotoren. Motorek má vnější průměr 80 mm a krytí IP50 motorek je proveden jako uzavřený. Tento stejnosměrný motorek výrobce upravuje dle požadavků zákazníka jako např. jiné krytí nebo úpravu hřídele na delší případně větší průměr a také provedení hřídele na obě strany. [4]

Tabulka 4 Parametry stejnosměrného motorku GR 80x40 z dokumentace výrobce [4]

| Výrobce       | Napětí [V] | Proud [A] | Výkon [W] | Jmenovitý moment [N·cm] | Otáčky [min <sup>-1</sup> ] | Hmotnost [kg] |
|---------------|------------|-----------|-----------|-------------------------|-----------------------------|---------------|
| dunkermotoren | 24         | 5,8       | 120       | 35                      | 2 900                       | 2,8           |

## 2.5 Stejnosměrný motorek CPB, BOSCH GmbH Německo

Německý výrobce BOSCH je jedním z největších výrobců stejnosměrných motorků v celosvětovém měřítku a dalších komponentů k nim. Produkty od výrobce BOSCH jsou známe svou spolehlivostí, kvalitou a také stálým inovujícím vývojem.

Stejnosměrný motorek CPB má vnější průměr 59 mm a celkovou délku 142 mm. Má obousměrný smysl otáčení, pravý i levý. Je konstruován na provoz S1 a krytí IP44. [5]

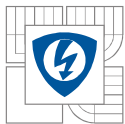
Tabulka 5 Parametry stejnosměrného motorku CPB z dokumentace výrobce [5]

| Výrobce | Napětí [V] | Proud [A] | Výkon [W] | Jmenovitý moment [N·cm] | Otáčky [min <sup>-1</sup> ] | Hmotnost [kg] |
|---------|------------|-----------|-----------|-------------------------|-----------------------------|---------------|
| Bosch   | 24         | 5         | 87,2      | 22,5                    | 3 700                       | 0,8           |



Obrázek 3 Stejnosměrný motorek od výrobce dunkermotoren a Bosch [4], [5]





### 3 VYHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ SEMESTRÁLNÍ PRÁCE

V semestrální práci byl zpracován přehled stejnosměrných motorků malého výkonu. Vybrané stejnosměrné motorky byly doplněny informacemi o jejich rozměrech a jmenovitých parametrech. Jmenovité parametry jsou u každého stejnosměrného motoru vloženy do tabulky. Také byly všechny motorky doplněny ilustračními obrázky, a v případě dostupnosti od výrobce přidána i charakteristika motoru. Tyto motorky pak byly vzájemně graficky porovnány mezi jejich jmenovitými veličinami v závislosti na momentu.

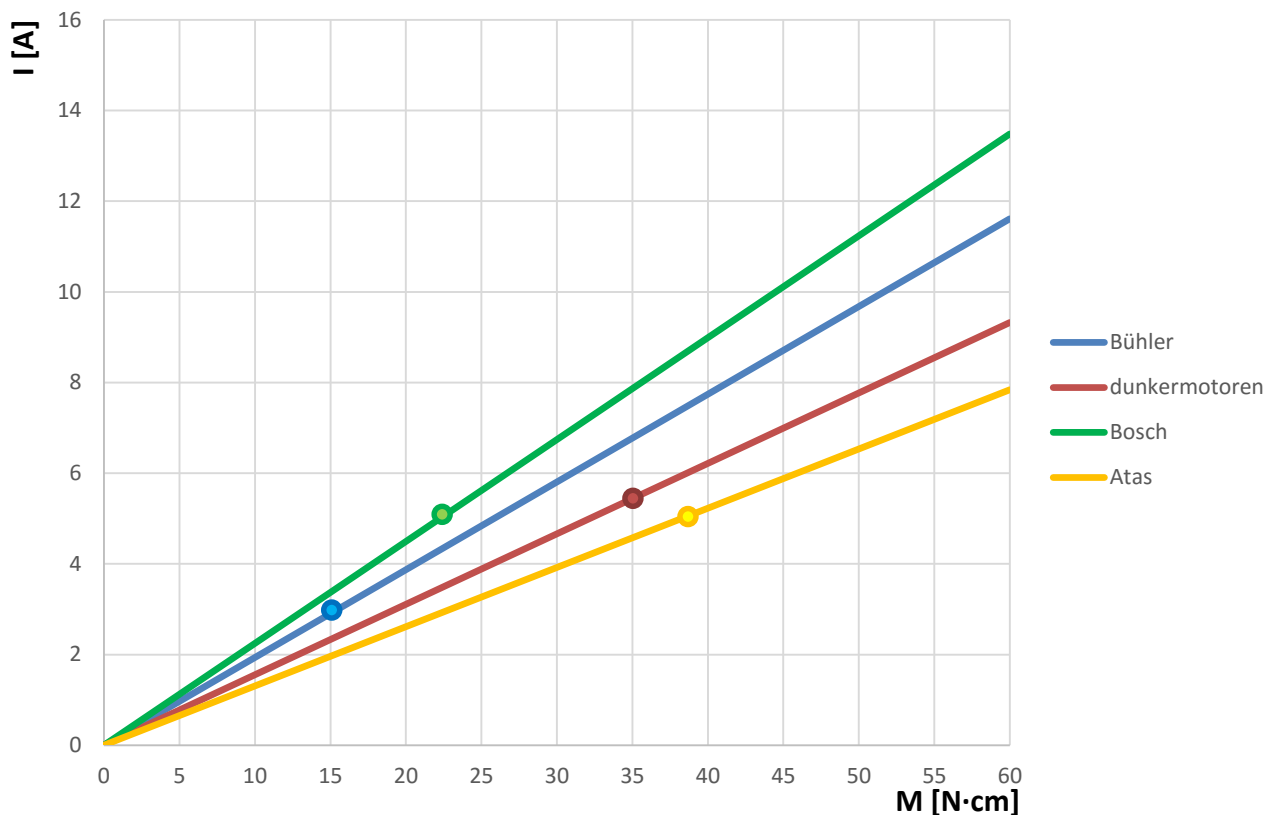
Semestrální práce byla rozdělena na tři části zadání. V první části byl zpracován přehled sériově vyráběných stejnosměrných motorků s permanentními magnety. Stejnosměrné motorky byly vybírány jak z českého trhu, tak ze zahraničních trhů podle několika kritérií na porovnání. Tato kritéria byla napájecí napětí 24 V, výkon do 200 W, typ provozu S1, uzavřené krytí, a jmenovité otáčky. Při porovnávání byly vzaty v úvahu všechny základní údaje o vybraných stejnosměrných motorech z dokumentací od výrobců. Dalšími údaji byly jmenovitý moment, napájecí proud a hmotnost. Porovnání bylo provedeno graficky. V druhé části byl vybrán jeden z uvedených stejnosměrných motorků a popsán podrobněji, než v první části. Pro tento popis byl vybrán stejnosměrný motorek s permanentními magnety od výrobce ATAS Náchod s typovým označením P2TV. Ve třetí, poslední části byly bez jakýchkoliv výpočtů nebo ověřování navrženy teoretické inovace na vybraném stejnosměrném motoru.

#### 3.1 Porovnání vybraných stejnosměrných motorků malého výkonu

Pro možnost porovnání byla zpracována data o stejnosměrných motorech malého výkonu a to z podkladů, které výrobci poskytují k motorkům jako základní technické parametry sloužící k obchodním účelům. V grafickém porovnání byly provedeny závislosti jmenovitých hodnot vybraných stejnosměrných motorků na momentu.

*Tabulka 6 Porovnávací tabulka parametrů vybraných stejnosměrných motorků*

| Výrobce       | $U_N$ [V] | $I_N$ [A] | $P_2$ [W] | $M_N$ [N·cm] | $n_N$ [min <sup>-1</sup> ] | $m$ [kg] | $\eta$ [%] | N·cm/kg | W/kg   | $\eta$ [%]/kg |
|---------------|-----------|-----------|-----------|--------------|----------------------------|----------|------------|---------|--------|---------------|
| Atas          | 24        | 5         | 80        | 38,2         | 2 000                      | 3,3      | 66,67      | 11,58   | 24,24  | 20,20         |
| Bühler        | 24        | 3,1       | 50        | 15           | 3 200                      | 0,765    | 67,2       | 19,61   | 65,36  | 87,84         |
| Engel         | 24        | 7,5       | 140       | 44,6         | 3 000                      | 2,65     | 77,78      | 16,83   | 52,83  | 29,35         |
| dunkermotoren | 24        | 5,8       | 120       | 35           | 2 900                      | 2,8      | 79,2       | 12,50   | 42,86  | 30,79         |
| Bosch         | 24        | 5         | 87,2      | 22,5         | 3 700                      | 0,8      | 72,67      | 28,13   | 109,00 | 90,84         |



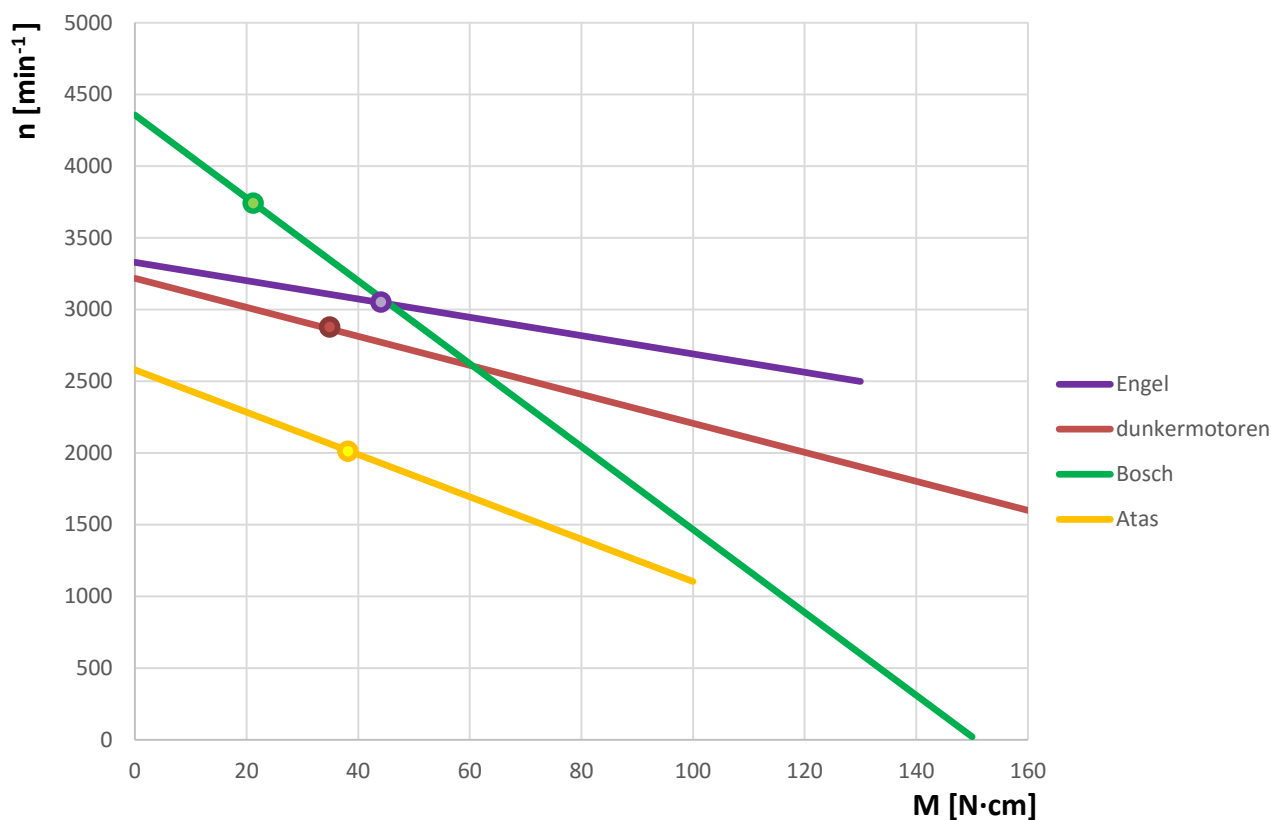
Obrázek 4 Srovnání jmenovitých proudů vybraných stejnosměrných motorků

Grafické srovnání v případě jmenovitých proudů bylo zpracováno na základě výrobci přikládaných katalogových listů sloužícím k obchodním účelům. Bohužel charakteristika pro jmenovitý proud u stejnosměrného motorku od výrobce Engel nebyla dostupná tak není uvedena ve srovnávacím grafu. Křivky byly zpracovány na základě odečítání stejných hodnot momentu a k nim odečtena hodnota proudu.

Od ostatních grafických srovnání se liší osa x maximálním momentovým rozsahem a to do hodnoty 60 N·cm. U ostatních provedených srovnávacích grafů je maximální hraniční hodnota momentu, který je na ose x nastavena na 160 N·cm. Tuto odlišnost způsobil fakt, že do 160 N·cm nebyly křivky provedené v původních materiálech.

Nejvyššího proudu dosahuje stejnosměrný motorek Engel a to 7,5 A při 44,6 N·cm, ovšem stejnosměrný motorek tohoto výrobce v grafu nemá uvedenu charakteristiku pro srovnání, protože nebyla dostupná.

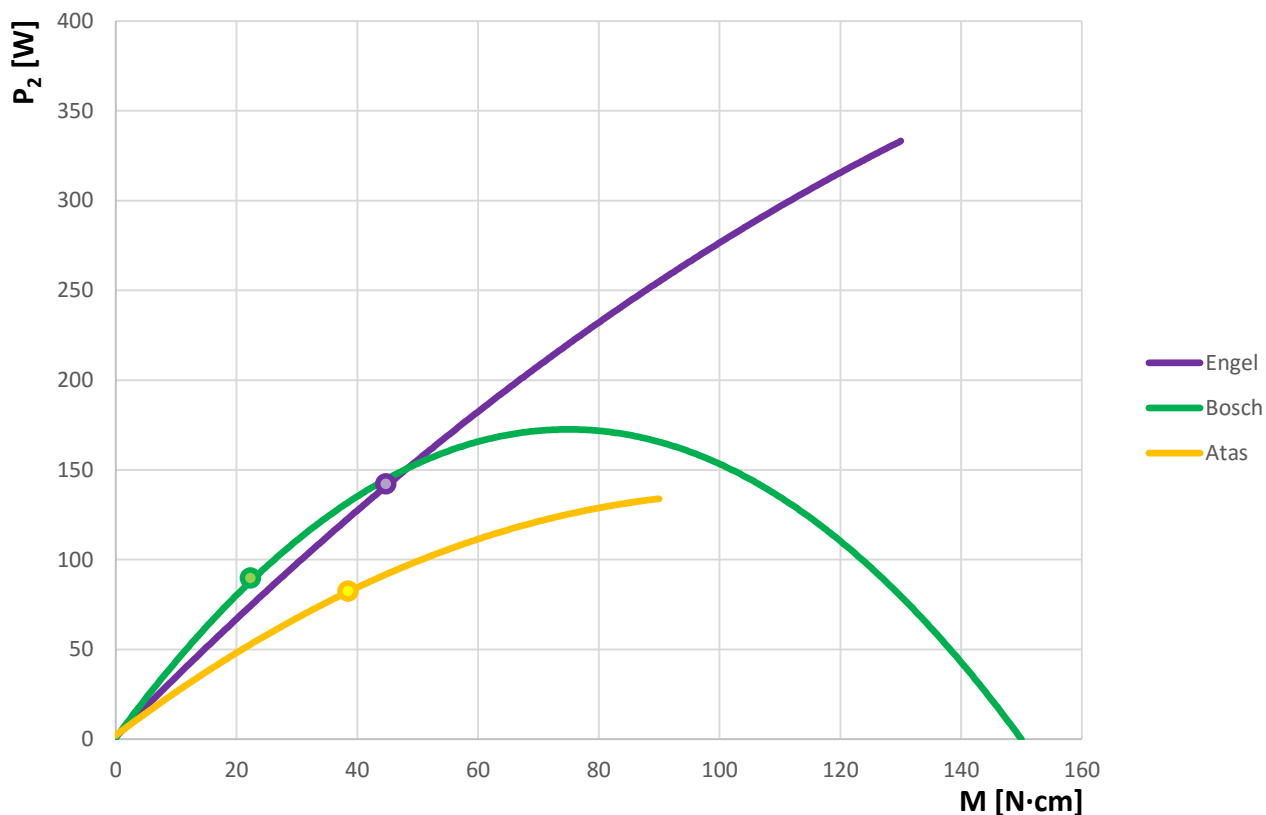
Body vyznačené na vynesných charakteristikách, které se shodují s barvou odpovídající pro daný motor značí jmenovitou hodnotu pro daný stejnosměrný motorek.



Obrázek 5 Srovnání jmenovitých otáček vybraných stejnosměrných motorků

Otáčkové zatěžovací charakteristiky byly zpracovány opět dle katalogových listů přikládaným k motorkům. Vypracovávání probíhalo stejně jako v případě proudového srovnání. Jak je, ale vidět liší se jedním motorkem, opět srovnávací graf není kompletní pro všech pět stejnosměrných motorků z přehledu. Zde byl tedy vynechán stejnosměrný motorek Bühler a místo něj byla oproti proudu vytvořena charakteristika jmenovitých otáček od výrobce Engel, který chyběl v proudovém srovnání. Charakteristiky, které nejsou ukončeny až na hranici grafu osy x nebyly do těchto hodnot zpracovány.

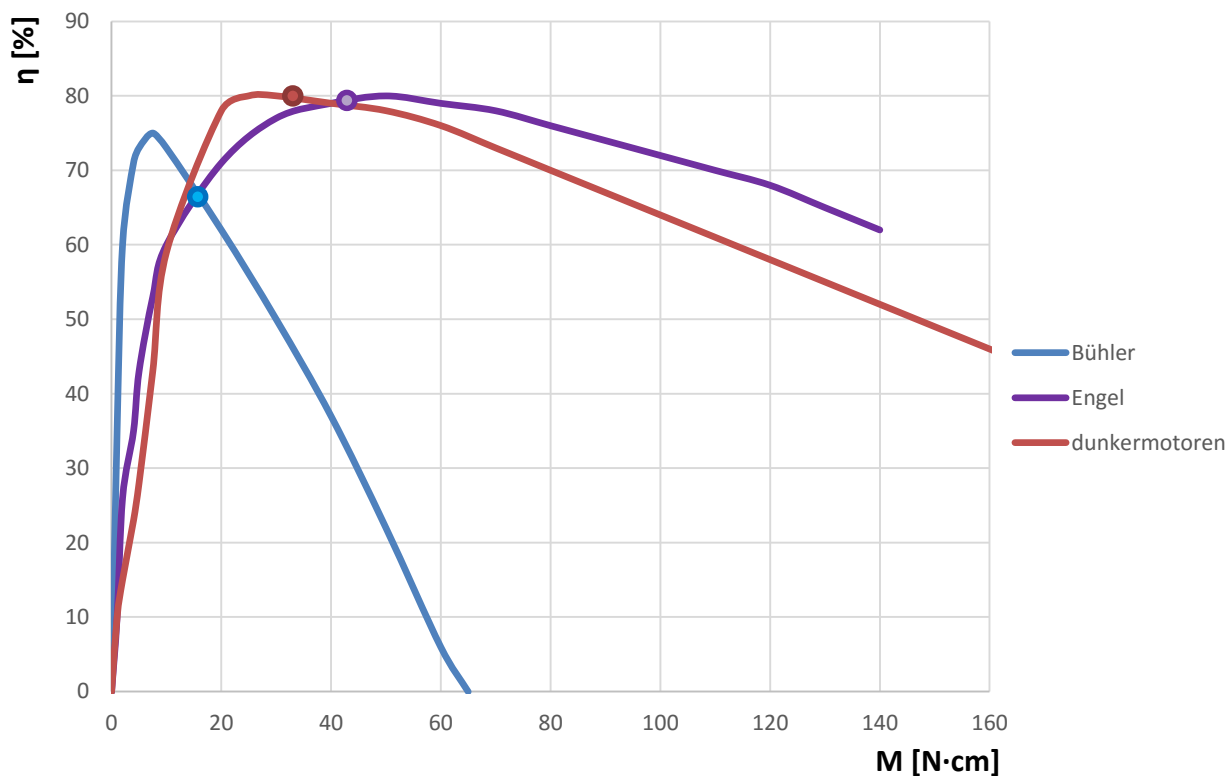
Nejvyšších jmenovitých otáček dosahuje stejnosměrný motorek od výrobce Bosch a to  $3\,700\text{ min}^{-1}$  v rámci jmenovitého srovnání momentů u nějž je  $22,5\text{ N}\cdot\text{cm}$ .



Obrázek 6 Srovnání jmenovitých výkonů vybraných stejnosměrných motorků

Křivky výkonů různých stejnosměrných motorů jsou výrobci vytvořeny rozdílnou formou. Někteří poskytují kompletní křivku někde jen náběh po maximální hodnotu a kousek sestupné části. Charakteristiky pro výkon jsem měl k dispozici pouze od tří stejnosměrných motorků z mnou vytvořeného přehledu. Z přehledu pěti stejnosměrných motorků chybí výkonová charakteristika od výrobce dunkermotoren a Bühler.

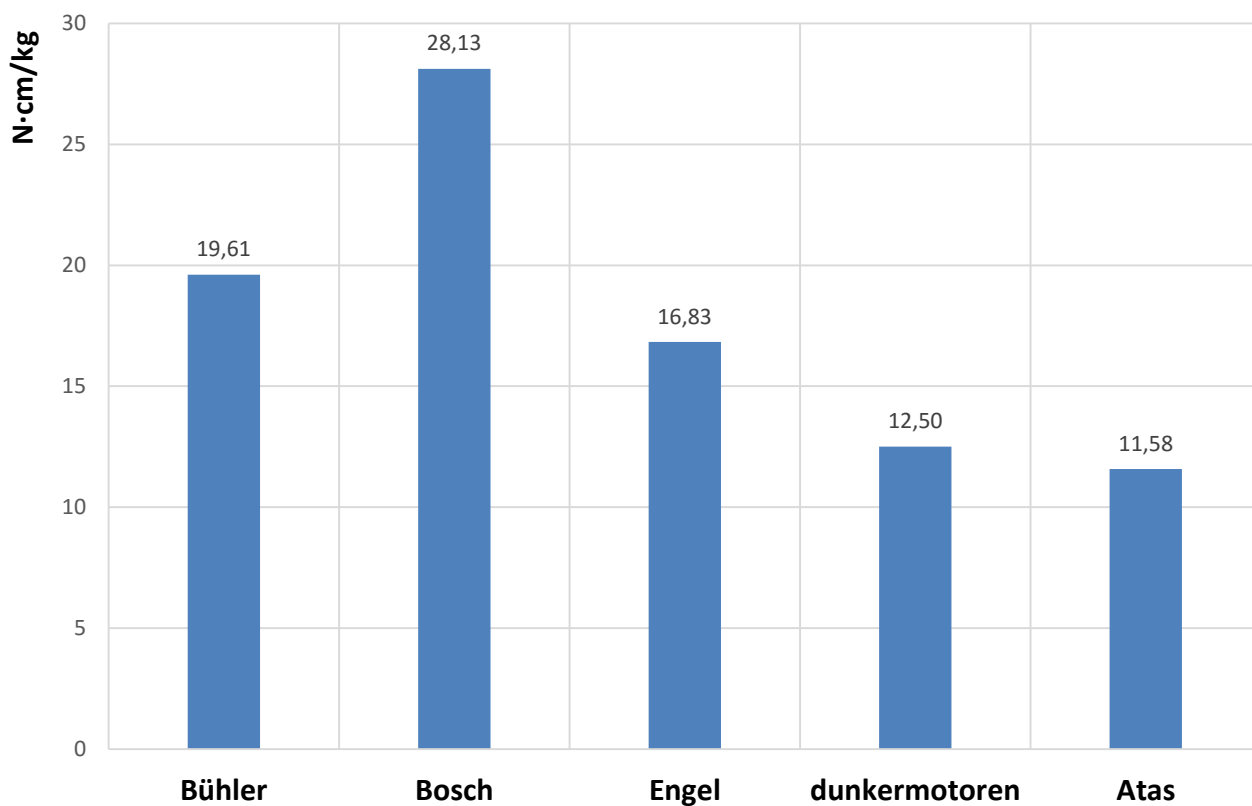
Stejnoseměrný motorek z přehledu s nejvyšším jmenovitým výkonem je i grafu srovnání uvedený motorek od výrobce Engel a to se 140 W při 44,6 N·cm.



Obrázek 7 Srovnání účinností vybraných stejnosměrných motorků

Charakteristiky pro jednotlivé účinnosti vybraných stejnosměrných motorků z přehledu byly vytvořeny také odečítáním pro jednotlivé hodnoty momentů. Ve srovnávacím grafu opět chybí dvě charakteristiky na srovnání a to od stejnosměrných motorků výrobců Atas a Bosch.

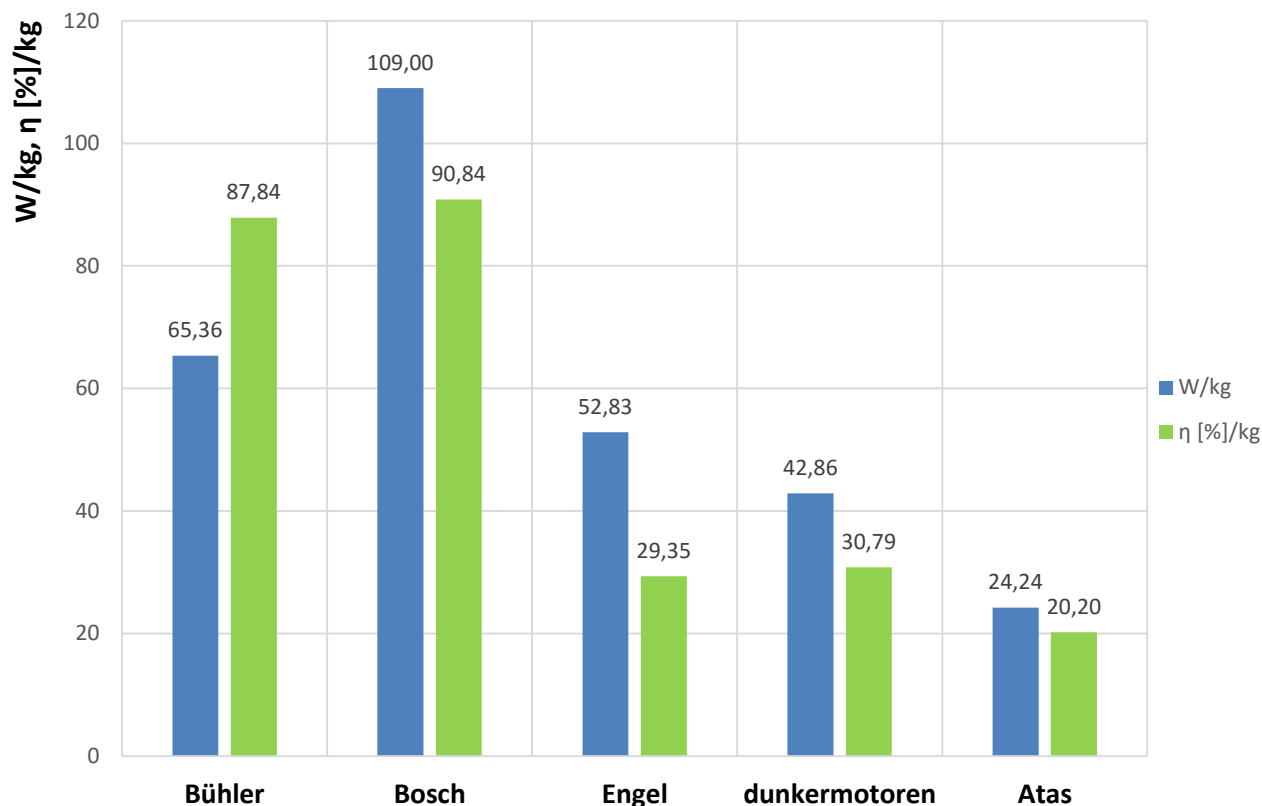
Nejvyšší účinnosti dosahuje stejnosměrný motorek od výrobce dunkermotoren.



*Obrázek 8 Vyjádření podílu jmenovitého momentu a hmotnosti motorku*

Jedná se o graf, který byl vytvořený na základě spočteného poměru mezi momentem a váhou motorku. Tedy kolik  $\text{N}\cdot\text{m}$  zvládne stejnosměrný motorek na kilogram. Jedná se o řešení sloupcovým grafem kde na x ose jsou výrobci a na ose y poměr  $\text{N}\cdot\text{cm}$  na  $\text{kg}$ .

Jako nejlepší stejnosměrný motorek z hlediska poměru  $\text{N}\cdot\text{cm}$  na  $\text{kg}$  byl vyhodnocen motorek od výrobce Bosch s hodnotou  $28,13 \text{ N}\cdot\text{cm/kg}$ .

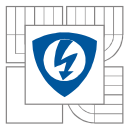


Obrázek 9 Vyjádření poměru jmenovitého výkonu, účinnosti na hmotnosti vybraných stejnosměrných motorků

Ve sloupcovém grafu byla znázorněna poměrová veličina. Jedná se o podíl jmenovitých výkonů a váhy daného stejnosměrného motorku.

Jako nejlepší motorek z poměru výkonu a hmotnosti vyšel od výrobce Bosch s hodnotou 109 W/kg. Stejně tak u poměru účinnosti a hmotnosti stejnosměrných motorků z přehledu dosáhl nejlepší hodnoty také stejnosměrný motorek od výrobce Bosch s hodnotou 90,84 %/kg.

V předchozím grafu poměru jmenovitého momentu a hmotnosti stejnosměrných motorků vyšel stejnosměrný motorek výrobce Bosch také nejlépe. Tedy po srovnání lze říci, že z vypracovaného přehledu stejnosměrných motorků vychází ve všech poměrových veličinách nejlépe stejnosměrný motorek výrobce Bosch.



## 4 ZÁKLADNÍ PROVOZY A TYPY KRYTÍ STEJNOSMĚRNÝCH MOTORKŮ

V praxi se stejnosměrné motorky využívají v různých aplikacích, a proto je třeba je vyrábět v různých typech pracovních stavů a také jejich bezpečnostního provedení pro prostředí, ve kterém se budou vyskytovat.

Typem krytí elektrických strojů je myšleno jejich konstrukční provedení, jakým jsou zpracovány, aby vyhověly danému stupni bezpečnosti, který je kladen na daný elektrický stroj.

Tuto kapitolu jsem zpracoval, protože druh provozu a typ krytí byly také rozhodujícími údaji při vypracovávání přehledu stejnosměrných motorků.

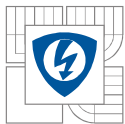
### 4.1 Značení a popis provozů elektrických strojů

Přehled pracovních stavů je uveden v tab. 7. V prvním sloupci byly uvedeny technické označení, které se vyskytují přímo na stroji. Druhá kolonka tabulky slouží pro detailní popis daného provozu. Provozem elektrického stroje je myšleno to, zda elektrický stroj pracuje nepřetržitě nebo potřebuje přestávky během provozu, případně další níže popsane jevy.

*Tabulka 7 Typy provozů stejnosměrných motorků [11]*

|           |   |
|-----------|---|
| <b>S1</b> | Kontinuální provoz  |
| <b>S2</b> | Krátkodobý provoz, kdy motor během dané doby dosáhne povolené tepelné hranice. Následující přestávka provozu musí být tak dlouhá, aby motor znovu nabyl okolní teplotu. |
| <b>S3</b> | Provoz s přestávkami, sekvence stejných pracovních period, kde každá perioda se skládá z dílu s konstantním výkonem a dílu s přestávkou.                                |
| <b>S4</b> | Provoz s rovnoměrně rozloženými starty, zátěžemi a přestávkami.   |
| <b>S5</b> | Provoz s rovnoměrně rozloženými starty, zátěžemi, brzděním nebo reverzním chodem a přestávkami.   |
| <b>S6</b> | Kontinuální pohon s periodickým zatěžováním a chodem naprázdno.   |
| <b>S7</b> | Provoz s rovnoměrně rozloženými starty, zátěžemi, brzděním nebo reverzním chodem bez přestávek.   |
| <b>S8</b> | Kontinuální pohon s občasným zatěžováním změnou otáček.   |
| <b>S9</b> | Kontinuální pohon s neperiodickým zatěžováním a změnami otáček. (typický provoz s frekvenčním měničem.  |





## 4.2 Krytí Stejnoseměrných motorků

Jedná se zde hlavně o bezpečnost, kterou vyžaduje dané prostředí, ve kterém bude elektrický stroj pracovat. Konstrukční provedení samotného elektrického stroje především jeho krytu tedy musí být provedeno v rámci norem popisujících tuto problematiku a také musí být elektrické stroje patřičně označeny. Proto je zde zpracován základní přehled krytových provedení.

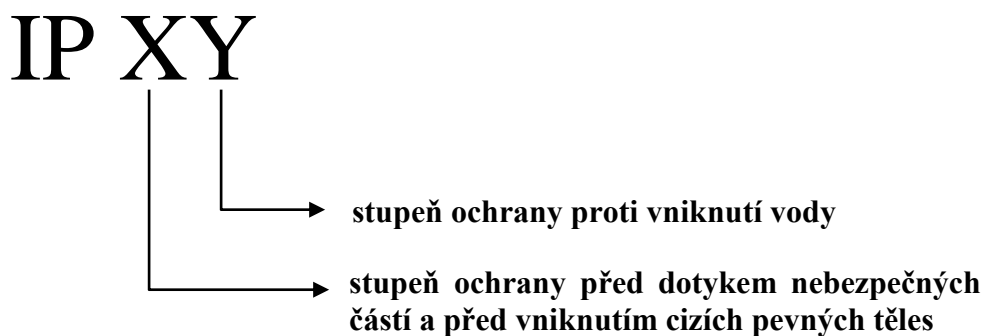
Provedení krytu se označuje IP kódem (International Protection) podle norem ČSN EN 60034-5, 35 0001 IEC 34-5 (ČSN EN 60529).

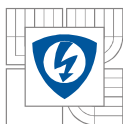
Tento kód definuje opatření, které určuje stupeň ochrany:

- osob před nebezpečným úrazem osob
- elektrického stroje před vniknutím cizích předmětů
- elektrického stroje před vniknutím vody

Nejčastěji používané druhy krytí u elektrických strojů dle IP kódu:

- otevřené provedení – IP 12, IP 21, IP 22, IP 23
- uzavřené provedení – IP 44, IP 54, IP 55, IP 56
- nevýbušné provedení např. pro těžbu apod.
- speciální provedení (např. ponorná)





Tabulka 8 Popis první vyskytující se první číslice IP kódu a jejich význam

[12]

| První číslice  |   |
|--|---|
| stupeň ochrany před dotykem nebezpečných částí a před vniknutím cizích pevných těles |   |
| IP 0x  | Nechráněno.   |
| IP 1x  | Zařízení je chráněno před vniknutím pevných cizích těles o průměru 50 mm a větších a před dotykem hřbetem ruky. |
| IP 2x  | Zařízení je chráněno před vniknutím pevných cizích těles o průměru 12,5 mm a větších a před dotykem prstem.     |
| IP 3x  | Zařízení je chráněno před vniknutím pevných cizích těles o průměru 2,5 mm a větších a před dotykem nástrojem.   |
| IP 4x  | Zařízení je chráněno před vniknutím pevných cizích těles o průměru 1 mm a větších a před dotykem drátem.        |
| IP 5x  | Zařízení je chráněno před prachem a před dotykem drátem.  |
| IP 6x  | Zařízení je prachotěsné a je chráněno před dotykem drátem.  |

Tabulka 9 Popis druhé číslice obsažené v IP kódu a jejich význam

[12]

| Druhá číslice                      |                         |
|------------------------------------|-------------------------|
| stupeň ochrany proti vniknutí vody |                         |
| IP x0                              | Nechráněno.             |
| IP x1                              | Svisle kapající.        |
| IP x2                              | Kapající ve sklonu 15°. |
| IP x3                              | Kropení, déšť.          |
| IP x4                              | Stříkající.             |
| IP x5                              | Tryskající.             |
| IP x6                              | Intenzivně tryskající.  |
| IP x7                              | Dočasné ponoření.       |
| IP x8                              | Trvalé ponoření.        |

Někdy mohou být součástí IP kódu i písmena a k nim ještě další doplňková. Dále také pro prostředí kde hrozí nebezpečí výbuchu se řídí vlastní normou a také mají své specifické označení. Zde nejsou tyto další o značení zmíněna, jak bylo řečeno na začátku jedná se o základní přehled značení krytí elektrických strojů.

Stejnoseměrné motorky z vypracovaného přehledu mají následující typy krytí. Stejnoseměrný motorek od výrobce Atas má krytí IP42, Bühler IP40, Engel IP54, dunkermotoren IP50, Bosch IP44.

## 5 ROZBOR STEJNOSMĚRNÉHO MOTORKU P2TV, ATAS ELEKTROMOTORY NÁCHOD A. S. ČESKÁ REPUBLIKA

Druhým bodem zadání práce bylo zvolení jednoho typu motorku z výše uvedených vyráběných strojů. Mnou vybraný stroj byl stejnosměrný motorek s permanentními magnety od výrobce ATAS elektromotory Náchod a. s. s označením řady P2TV.

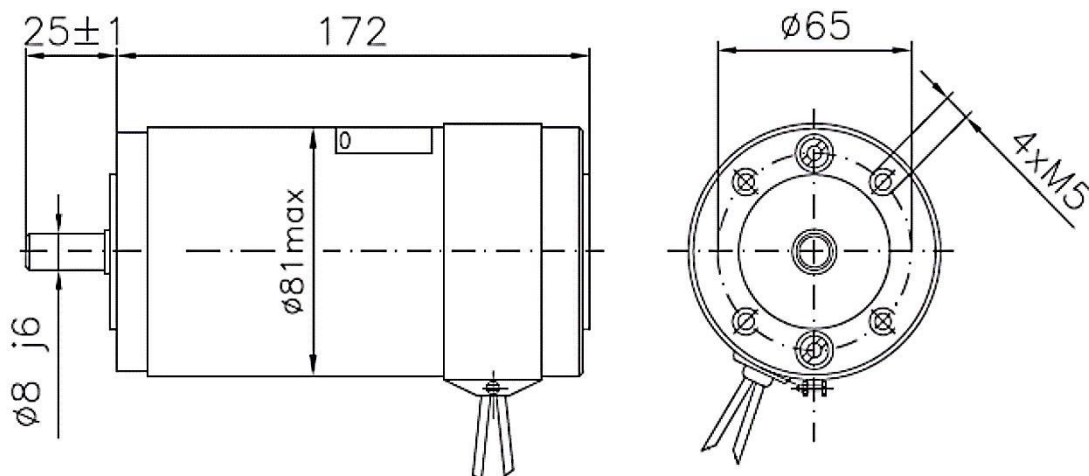
Tento stejnosměrný motorek je určen k používání pro pohon spotřebičů, přístrojů a běžných regulačních, mechanizačních a automatizačních zařízení. Pracuje v provozu S1 tedy v kontinuálním (nepřetržitém) provozu a má krytí IP 42. Motorek také pracuje ve všech možných polohách provozu v obou smyslech otáčení.



*Obrázek 10 Stejnosměrný motorek typ P2TV [1]*

Prvním krokem byly zjištěny z dokumentace výrobce, které poskytuje zákazníkům na svých stránkách, základní parametry motorku. Stejnosměrný motorek P2TV je vyráběný v několika napětových hladinách pro mou práci byl vybrán motorek s napětovou hladinou 24 V.

[1, 8]



Obrázek 11 Náčrtek motorku P2TV z dokumentace výrobce [1]

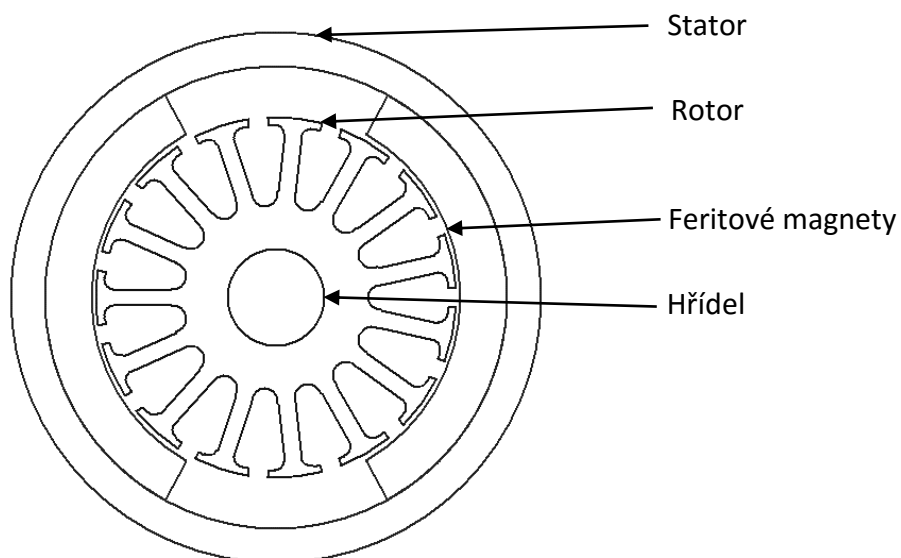
Stejnoseměrný motorek ATAS P2TV má kostru statoru vyrobenou z bezešvé trubky, aby splňoval co nejideálnější kruhový tvar. Dále má na statoru přichyceny feritové permanentní magnety, které byly radiální orientace a jejich tloušťka byla max. 7,3 mm. Feritové magnety jsou ke statorové kostře přilepené. Jedná se o klasické feritové magnety, které mají následující vlastnosti tedy remanentní indukci  $B_r = 0,37 \text{ T}$  a koercitivní sílu  $H_c = 220 \text{ kA/m}$ .

Rotor je vyrobený z elektrotechnické oceli M700-50A. Skládá se tedy z plechů o tloušťce 0,5 mm a měrnými ztrátami 7 W/kg. Do rotorových plechů je vyraženo 15 drážek, vnější průměr rotoru je 55 mm a otvor pro hřídel je o průměru 15 mm. Rotor je celkem složen ze 120 plechů z výše uvedeného plechu.

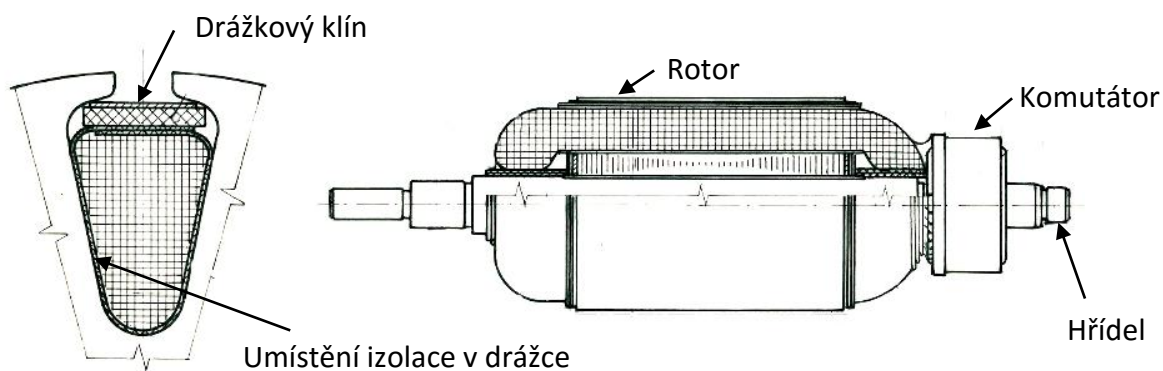
Rotorové vinutí je utvořeno no z měděného drátu s průměrem jádra 0,75 mm. Na jednu drážku připadá 32 závitů tohoto vodiče. Činitel plnění je  $k_{pCu} = 0,34$ .

Stejnoseměrný motorek P2TV má ložiskové štíty z hliníku, příruba je podle normy DIN 42 016 a ČSN 35 0040, ložiska jsou použita kuličková a kartáče jsou z elektrokarbonového materiálu s rozměry 8x10x16 mm.

Komutátor je měděný a lamely jsou vzájemně odizolovány mikanitem. Rozměry komutátoru jsou následující průměr 35 mm a jeho délka je 14,5 mm. Ke komutátoru přiléhají grafitové kartáče s rozměry 8x10x16 mm. Kde rozměr 8x10 mm je plocha kartáče a 16 mm je rozměr délky kartáče.



Obrázek 12 Model stejnosměrného motorku P2TV utvořeného v Ansoft Maxwell RMXprt



Obrázek 13 Náčrtek celého rotoru i s hřídelí a výřez rotorové drážky [8]

## 6 OBECNÉ MOŽNOSTI INOVACÍ STEJNOSMĚRNÝCH MOTORKŮ

V dnešní době je ve většině odvětví hodně uplatňována inovace, která spočívá ve zmenšení nákladů na výrobu a její ztrátovosti i k vylepšování vlastností vyráběných věcí.

Tato práce byla věnována inovacím na vylepšení vlastností sériově vyráběného stejnosměrného motorku. Tento typ inovací se snaží využít modernějších materiálů a metod. Ovšem tento typ inovací často však naráží na ekonomický problém, kdy tyto inovace mohou pak ve výsledku zdražit vyráběný produkt, takže se použijí například pro laboratorní účely.

U stejnosměrného motorku s permanentními magnety máme několik hlavních možností úprav a těmi jsou změna materiálů permanentních magnetů, kostra motorku, rotorové plechy a komutátor.

### 6.1 Kostra motorku

Kostry stejnosměrných motorků bývají často nepřesné, a proto na nich vznikají větší ztráty. To je způsobeno tím, že většina výrobců kostry motorků pouze stáčí, přidělají mechanický zámek a svaří je, proto vznikají nepřesné spoje a také nedokonalý kulatý tvar. Vznikají tedy ztráty ve vzduchových mezerách a to jak ve spojích tak parazitní ztráty mezi kóstrou stejnosměrného motorku a permanentními magnety.

V dnešní době by bylo lepší, kdyby se kostra u menších stejnosměrných motorků malého výkonu vyráběla z přesných bezešvých trubek (tvářené na přesné rozměry).

Výrobci tyto trubky vyrábí dle daných norem jak podnikových tak státních a mezinárodních. Přesné bezešvé trubky tažené za studena někteří výrobci vyrábí dle svých katalogových rozměrů, případně na zakázku. [6]



Obrázek 14 Přesné bezešvé trubky

[6]

## 6.2 Permanentní magnety

U permanentních magnetů se nabízí hned několik možností inovací. Jako první je změna materiálu permanentních magnetů. Dalšími možnostmi je tvar permanentních magnetů, jejich poloha na statoru tím pádem i jejich počet a velikost mezer mezi jednotlivými permanentními magnety.

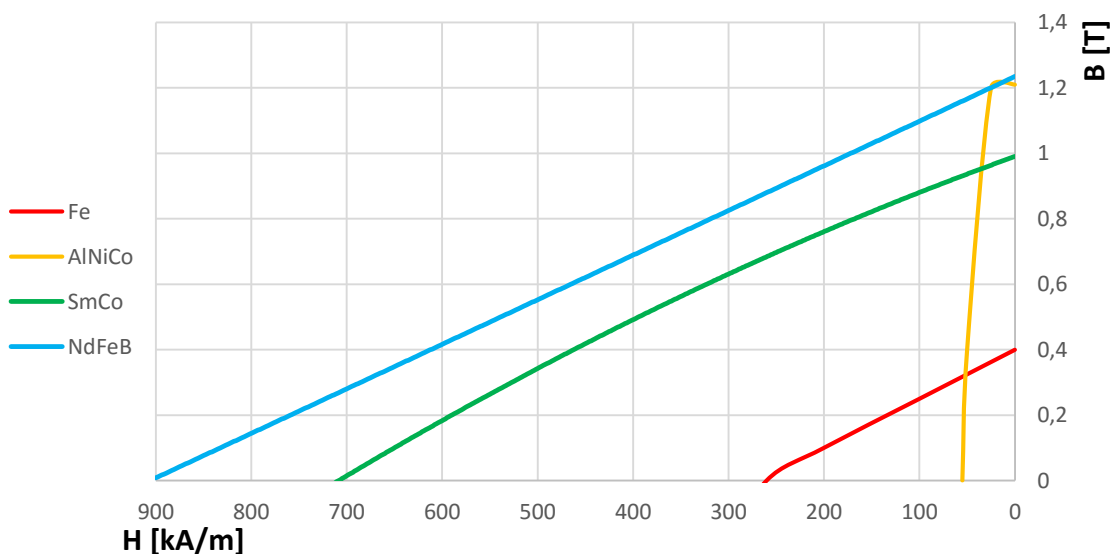
U stejnosměrných motorků potřebujeme velmi dobré magnetické vlastnosti, používají se tedy magneticky tvrdé materiály, které splňují tuto podmínku, ovšem jsou velmi křehké a je obtížné je opracovat, což vyplývá z jejich tvrdosti. Pracovní teploty těchto magnetů se pohybují od  $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$  do  $+250\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

Pro inovaci, aby bylo dosaženo co nejlepších výsledků, by bylo nejlepší použití permanentních magnetů ze vzácných zemin jako jsou NdFeB a SmCo. Permanentní magnety ze vzácných zemin mají však svá úskalí. Týkají se především rozměrů stroje a způsobu výroby. Permanentní magnety typu NdFeB jsou náchylné ke korozi, a je třeba provést povrchovou úpravu. Tyto materiály mají pracovní teploty až do  $+350\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Jejich patrnou nevýhodou je velmi vysoká cena. [7, 9]



Obrázek 16 Permanentní magnety z materiálu NdFeB a SmCo

[7], [9]



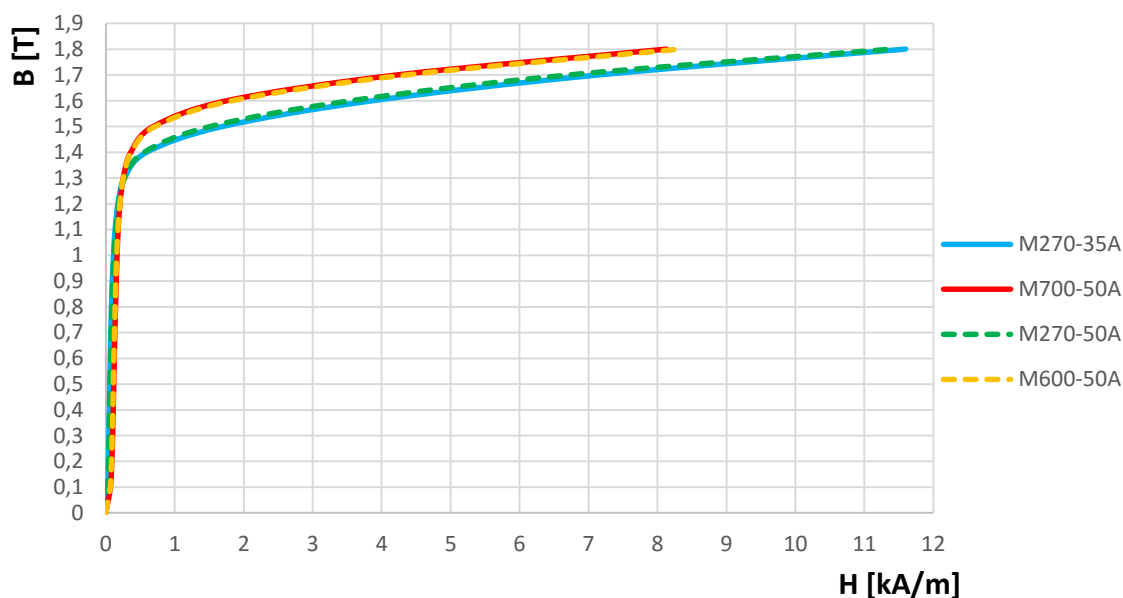
Obrázek 15 Demagnetizační křivky pro různé typy magnetů

[17]

## 6.3 Rotorové plechy

Rotorové plechy jsou v rotoru seskládány na sebe spolu s izolací, která se nachází mezi jednotlivými plechy. V této části stejnosměrného motorku není moc možností pro inovace, pouze druh materiálu, který zvolíme. Ve stejnoměrném motorku P2TV se na výrobu rotorových plechů použila ocel s označením M700 – 50 A. Jedná se o měkkou ocel, která se používá z důvodu, aby se tak výrazně neopotřebovávaly razicí nástroje. Tato ocel je však dostatečně pevná a levná.

K lepším vlastnostem by nám dopomohly transformátorové plechy. Bohužel tyto plechy nesplňují dostatečnou pevnost pro rotující části. Z toho poznatku se dá ovšem říci, že by nám vyhovovala ocel s větším obsahem křemíku, ale také aby splňovala dostatečnou pevnost a měla i lepší magnetické vlastnosti než normální používaná ocel.



Obrázek 17 Porovnání několika typů elektrických ocelí

[15]

## 6.4 Komutátor

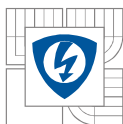
Tvoří jednu z nejzásadnější částí stejnosměrného stroje. Komutátory se vyrábí z mědi. Jako izolační materiál se používá lepená slída, přesněji mikanit.

Ke komutátoru je zapotřebí ještě kartáčů. Kartáče se vyrábí z grafitu s příměsí mědi (50 %). Měď se používá ke snížení odporu kartáčů a přechodového odporu. Jako další materiál se používá bronz s malou vrstvou stříbra v místě dotyku s komutátorem. Tato varianta má nižší odpor a delší životnost než grafitové.

U komutátoru je také velmi důležitý přítlak kartáčů ke komutátoru, který pak ovlivňuje ztráty na komutátoru a to velikostí napěťového úbytku. Konstrukčním cílem je mít na kartáčích co největší přítlak, aby nedocházelo k jejich odsakování. Ovšem s větším přítlakem, máme větší i ztráty na komutátoru. Dále v případě grafitových kartáčů zanášením lamel komutátoru vedoucí opět ke zhoršení ztrát na komutátoru.

[13]





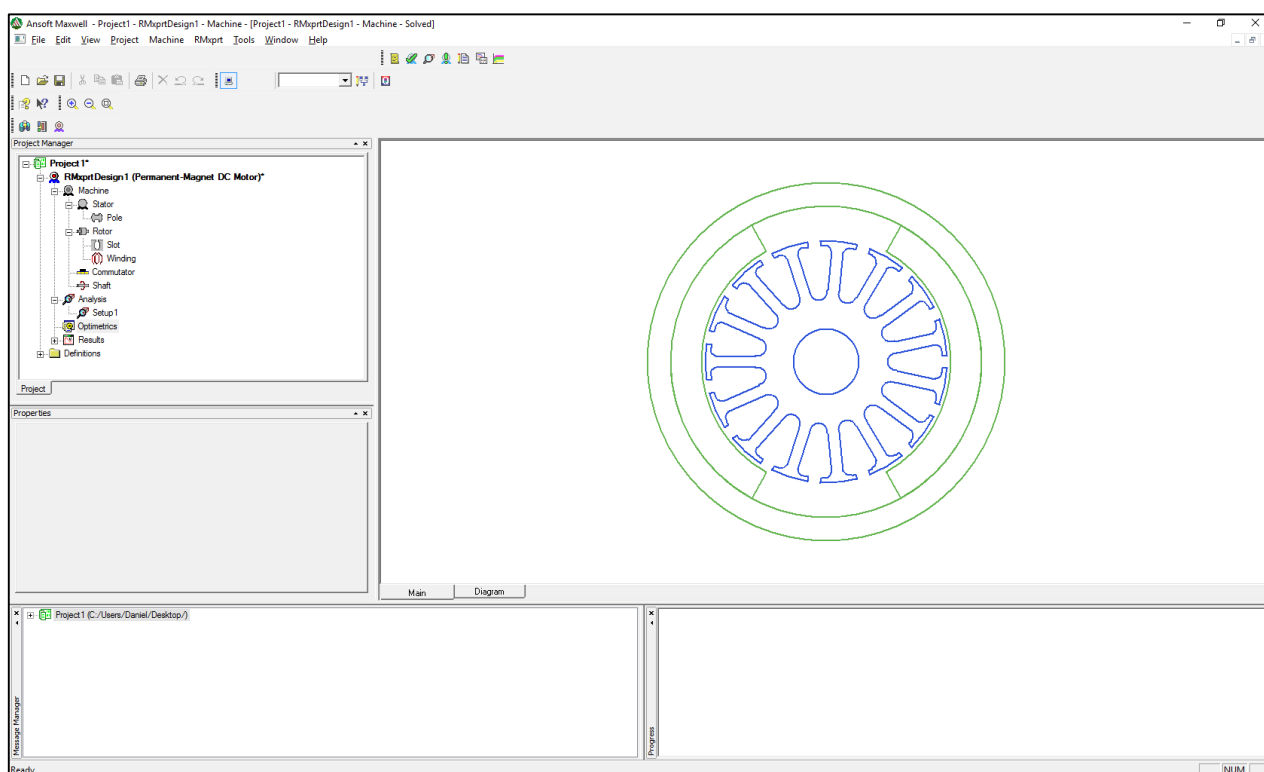
## 7 VÝPOČTY V ANSOFT MAXWELL

Ansoft Maxwell je software určený pro simulace elektromagnetických polí. V softwaru už jsou vloženy nástroje pro jednotlivé návrhy elektrických strojů a jejich optimalizaci. K výpočtům používá Ansoft Maxwell metodu konečných prvků.

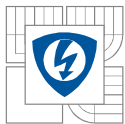
Metoda konečných prvků v podstatě spočívá v rozdělení do mnoha prvků jednoduchého tvaru, které se nazývají konečné prvky. Prvky jsou určeny svými vrcholy nebo-li uzly. Jako nejjednoduššími prvky jsou myšleny pro rovinu trojúhelník a čtyřúhelník, v případě prostoru pak čtyřstěn, pětistěn a šestistěn. V každém takovém prvku je pak veličina popsána parciální diferenciální rovnicí. [18]

### 7.1 Prostředí RMXprt

Jedná se o zjednodušený výpočetní nástroj, který urychluje navrhování a optimalizaci točivého elektrického stroje. Prostředí RMXprt obsahuje již 13 přednastavených šablon motorů a generátorů. Rmxprt také využívá klasické analytické teorie elektrických točivých strojů a magnetických obvodů a dokáže z nich určit např. momentovou charakteristiku stroje.



Obrázek 18 Snímek obrazovky při práci v prostředí RMXprt [18]



## 7.2 Úprava na M270 – 35A

Jedná se o úpravu plechů kotvy a to, že z původní použité oceli M700 – 50A použijeme tenčí ocel. Tuto hodnotu tloušťky můžeme vyčíst přímo z názvu dané oceli, jde o druhou část názvu oceli tedy 50A  $\rightarrow$  0,5 mm tloušťka jednoho plechu u M270 – 35A je tedy 35A  $\rightarrow$  0,35 mm tloušťkou jednoho plechu kotvy. První část názvu oceli nám značí velikost měrných ztrát na hmotnost. Tedy v případě M700  $\rightarrow$  jsou ztráty 7 W na kg a v případě M270  $\rightarrow$  je tato hodnota 2,7 W na kg.

Změna probíhala v přepočtu z tloušťky plechu na nový počet plechů kotvy a to z původních 120 na 174 plechů. Původní délka kotvy tedy byla 60 mm nyní je 60,9 mm.

Změna elektrotechnické oceli na kotvě motorku vyvolala jisté zlepšení a to u všech srovnávaných veličin jako je proud, moment, účinnost a výkon motorku.

## 7.3 Zvýšení činitele plnění rotorové drážky

Při této úpravě bylo upraveno vinutí kotvy na jiný průměr jádra vodiče a to z původního průměru jádra vodiče 0,75 mm na 0,85 mm. Průřez je zvolen dle zvýšení plnění drážky rotoru z původních 0,34 na 0,4 při zachování stejného počtu navinutých vodičů a to 32. Celková plocha drážky je 70,6 mm. Při navinutí vodičem s průměrem jádra 0,75 mm je navinutá plocha rovna 24 mm<sup>2</sup> u vodiče s průměrem jádra 0,85 mm je navinutá plocha rovna 27,2 mm<sup>2</sup>.

## 7.4 Permanentní magnety NdFeB30

V této úpravě motorku byly zaměněny původní feritové permanentní magnety za magnety ze vzácných zemin a to konkrétně železo-neodym-bór. Tloušťka původních feritových permanentních magnetů byla 7 mm. Permanentní magnety z NdFeB byly kvůli jejich síle nastaveny na tloušťku 2 mm.

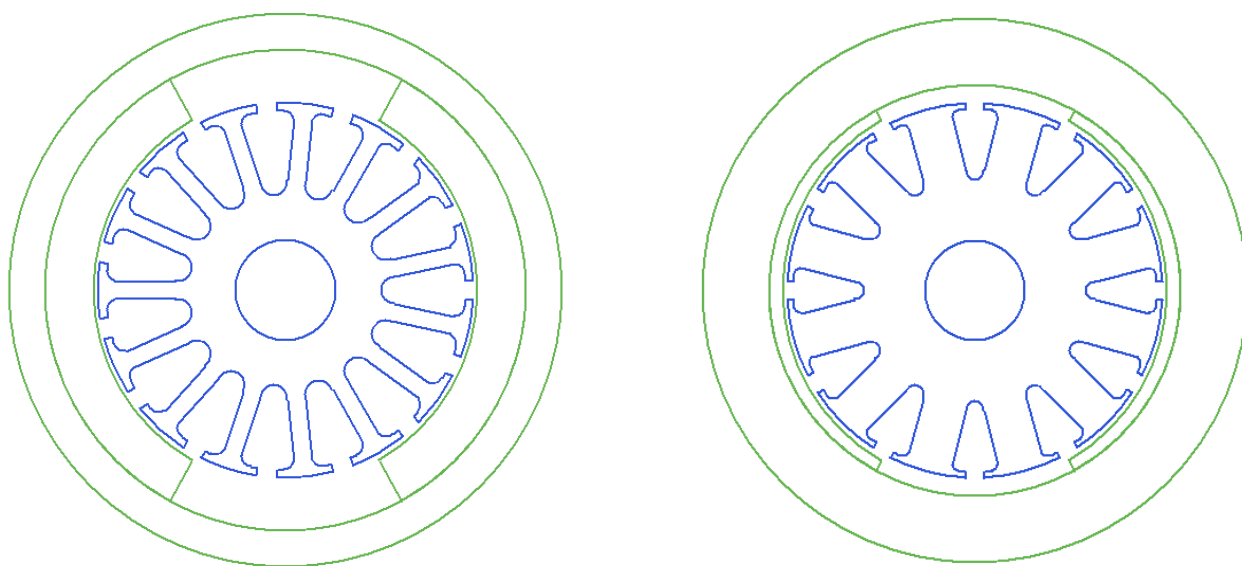
Permanentní magnety NdFeB jsou ovšem oproti feritovým permanentním magnetům mnohonásobně silnější. Díky tomu nám v motorku vznikají velké magnetické indukce B [T]. Bylo tedy nutné upravit rozměry motorku oproti původnímu modelu. V oblasti statoru se jednalo o zvětšení vnitřního průměru o 1 mm. Rotor byl zvětšen o 1 mm vnějšího průměru pro zachování výšky vzduchové mezery. Dále byl rotor prodloužen o 4 mm, počet rotorových plechů tedy stoupl na 128 a počet rotorových drážek byl snížen na 12 a počet vodičů na jednu drážku na 22 vodičů průřezu stejného jako u původního motorku. Samotná rotorová drážka prošla také úpravou rozměrů, kdy ve výsledku byla užší a kratší než původní drážka. Z modelu původního motorku kde plocha drážky byla 70,41 mm<sup>2</sup> nyní drážka měla plochu 53,13 mm<sup>2</sup>. Tyto úpravy rotorové drážky a vodičů se promítly do činitele plnění drážky a to tak, že došlo k jeho snížení na 0,31.

## 7.5 Permanentní magnety NdFeB30 a vodič 0,8 mm

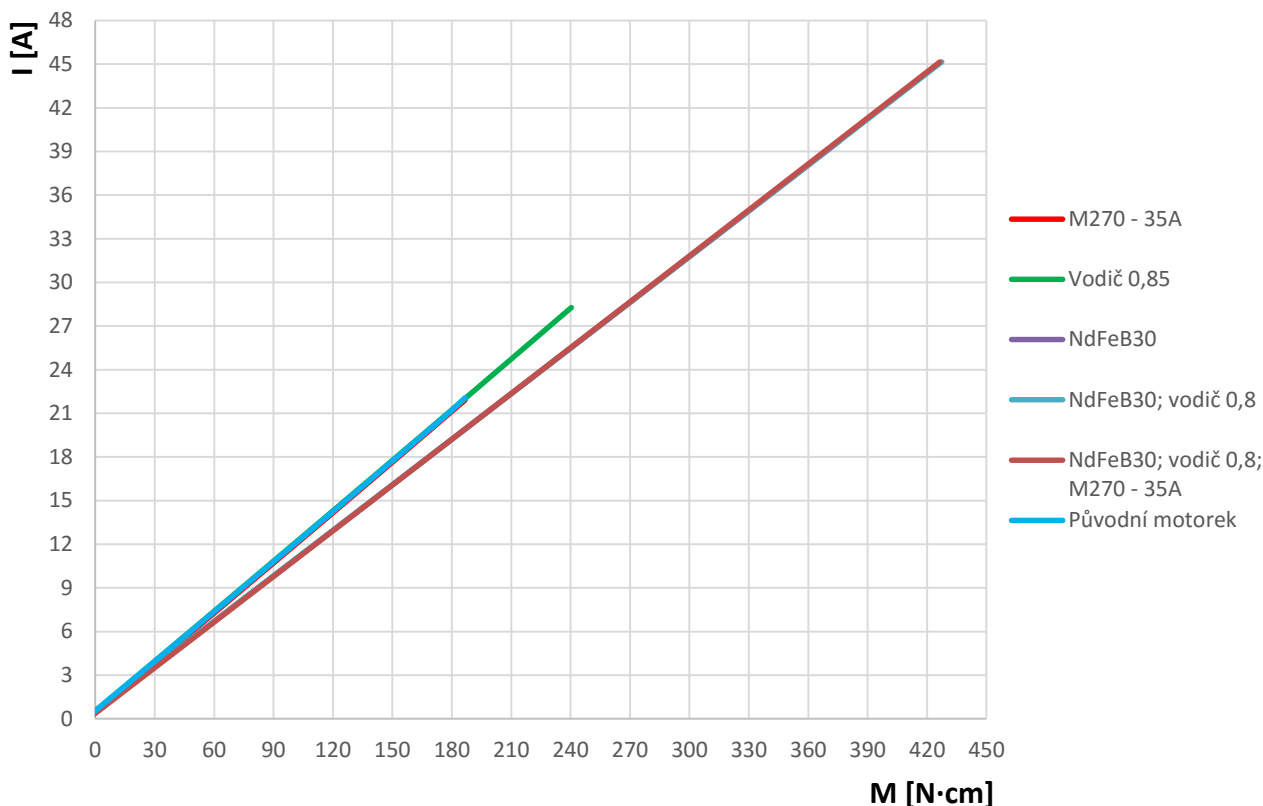
Původní feritové magnety zde byly také nahrazeny z neodymu-železo-bóru o stejné tloušťce jako v předchozí úpravě. Stejně tak ostatní upravené parametry a velikosti byly ponechány. V této úpravě byl nahrazen původní vodič s průřezem 0,75 mm vodičem o průřezu 0,8 mm. Tedy byl zvýšen činitel plnění drážky a to na hodnotu 0,33. Počet vodičů je stejný jako v předchozí úpravě tedy 22 vodičů na drážku.

## 7.6 Permanentní magnety NdFeB30, vodič 0,8 mm a M270 – 35A

Úprava opět obsahovala permanentní magnety ze vzácných zemin o tloušťce 2 mm. Ostatní předchozí provedené úpravy, které byly provedeny v předchozích krocích, zde byly obsaženy také, i varianta s větším plněním drážky 0,33 tedy vodičem 0,8 mm. K těmto předchozím úpravám byla přidána další a to v podobě výměny elektrotechnické oceli, ze které jsou vyráběny rotorové plechy. Jedná se o ocel M270 – 35A, která se vyznačuje menšími měrnými ztrátami na kilogram a má menší tloušťku. Bylo zapotřebí více plechů a to 183 pro rozměr rotoru 64 mm.



*Obrázek 19 Model původního stejnosměrného motorku Atas P2TV v RMxpřt a upravený motorek s permanentními magnety ze vzácných zemin NdFeB30*

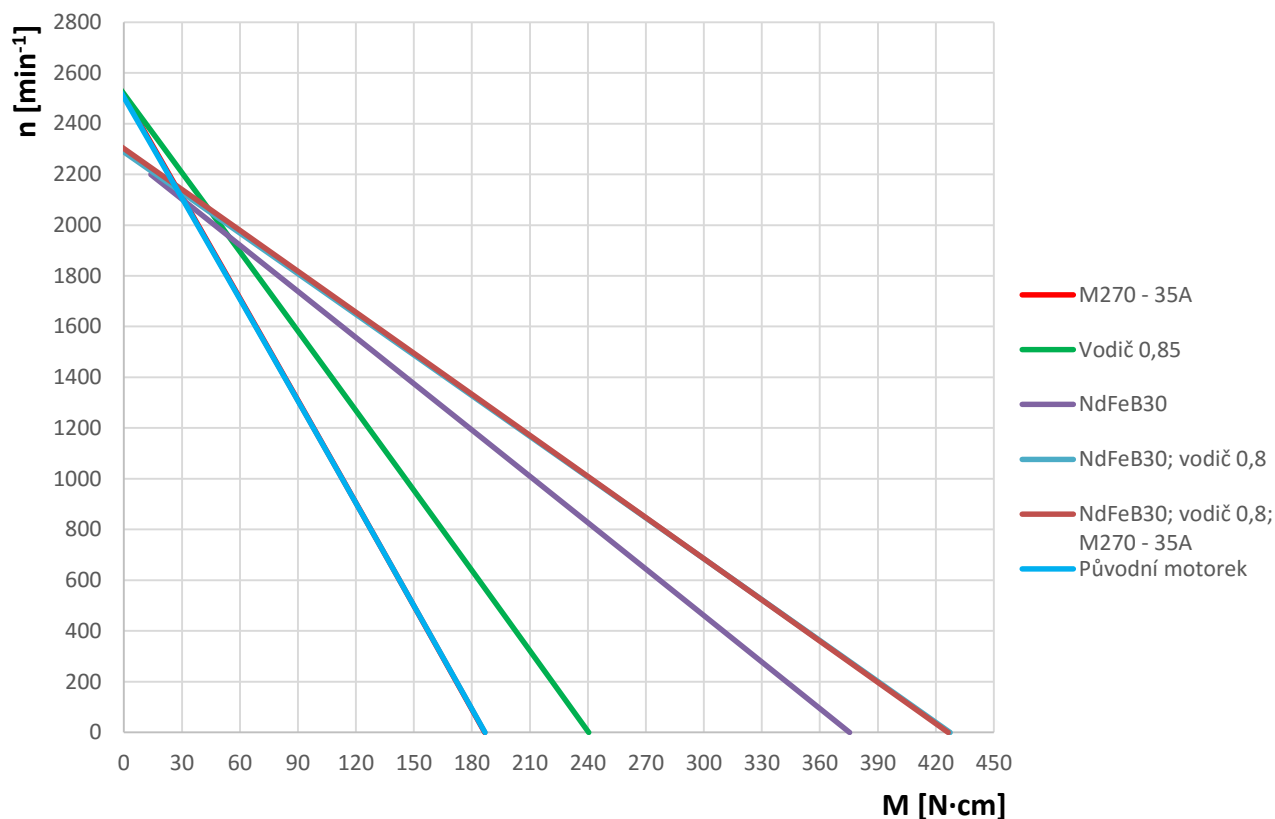


Obrázek 20 Zobrazení proudových charakteristik a jejich porovnání z RMxprt

Jde o porovnání proudových charakteristik vůči původnímu stejnosměrnému motorku výrobce Atas P2TV. Některé křivky se v grafu překrývají, ale jednoznačně je vidět, že u úpravy vodiče na 0,85 mm a následně úpravy na permanentní magnety ze vzácných zemin NdFeB30 se nám zvednul proud nakrátko a záběrný moment je tedy také vyšší. Překrývající se charakteristiky jsou charakteristika původního motorku a úprava na elektrotechnickou ocel M270 – 35A a další překryté charakteristiky se týkají všech úprav s permanentními magnety NdFeB30, ze kterých je nejlépe vidět charakteristika odpovídající poslední úpravě magnetů NdFeB30, vodiče s průměrem jádra 0,8 a rotorových plechů z oceli M270 – 35A.

Původní motorek dosahoval hodnoty proudu nakrátko 22,10 A a záběrný moment byl 186,87 N·cm. U změny vodiče na průměr jádra 0,85 mm byl proud nakrátko 28,27 A, záběrný moment byl 240,42 N·cm. Nejvyšší hodnoty jak proudu nakrátko, tak záběrného momentu dosahoval motor s úpravou permanentních magnetů NdFeB30 a vodiče s průměrem jádra 0,8 mm. Proud nakrátko byl 45,15 A a záběrný moment byl 427,34 N·cm.

V případě úpravy materiálu rotorových plechů tedy změna na ocel M270 – 35A došlo k mírnému poklesu jak proudu nakrátko a to na 21,9 A. Nižší proudy tato úprava vykazovala v celém otáčkovém rozsahu. Při vyšších otáčkách bylo dosaženo i mírně vyššího momentu např. při 2 000 min<sup>-1</sup> byl proud 4,82 A a moment 38,42 N·cm. Původní model motorku při 2 000 min<sup>-1</sup> měl proud 4,86 A a moment 38,14 N·cm.

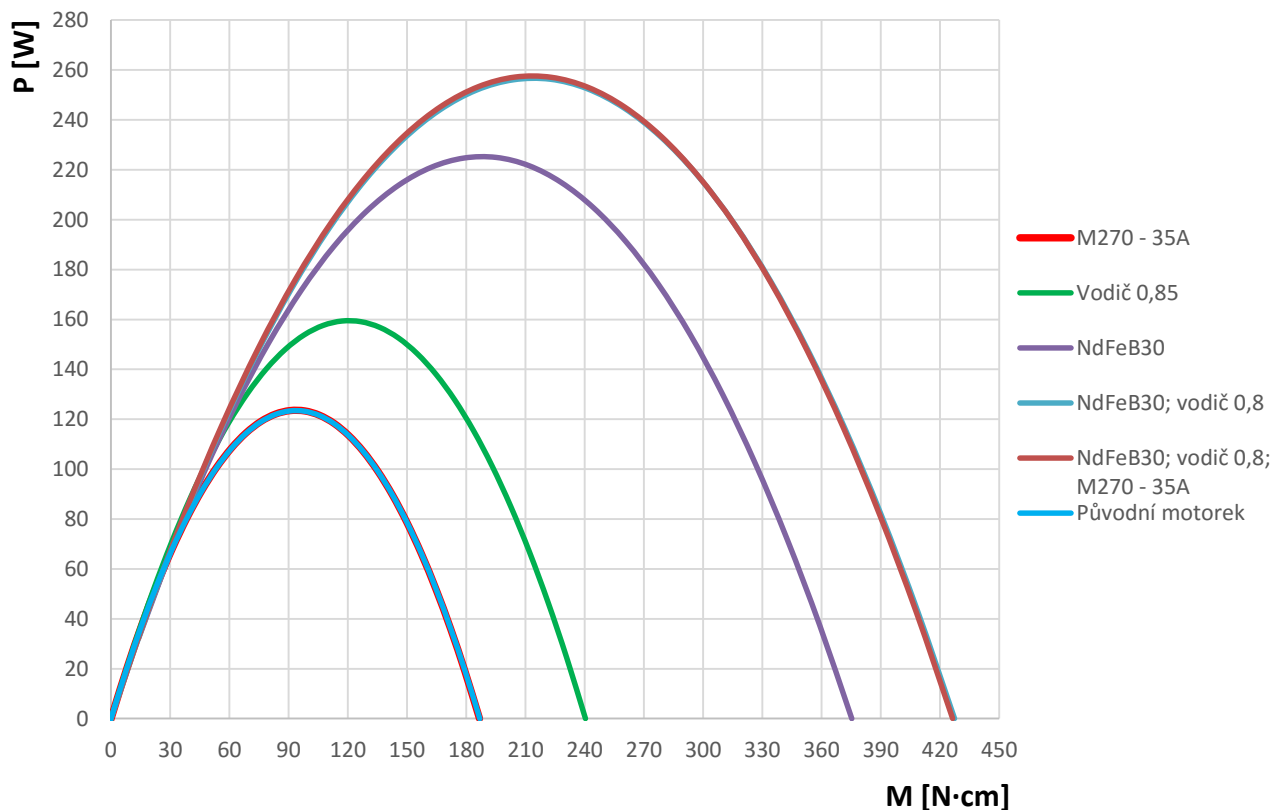


Obrázek 21 Otáčkové charakteristiky jednotlivých úprav stejnosměrného motorku

Závislosti otáček stejnosměrného motorku na momentu při provedených úpravách. Tyto otáčkové charakteristiky jsou vztaženy k původnímu modelu stejnosměrného motorku. Zde je na první pohled vidět, že při úpravách došlo k posunu otáček naprázdno. Ovšem některé charakteristiky nejsou z důvodu překrytí naprosto zřetelné. Jedná se o charakteristiku původního motorku s úpravou rotorových plechů na elektrotechnickou ocel M270 – 35A a úprav s permanentními magnety NdFeB30, vodiče s průměrem jádra 0,8 mm s úpravou obsahující navíc ještě rotorové plechy s ocelí M270 – 35A.

Nejvyšších otáček naprázdno dosahoval stejnosměrný motorek s úpravou vodiče s průměrem jádra 0,85 mm a to  $2518 \text{ min}^{-1}$ . Naopak nejnižších otáček stejnosměrného motorku naprázdno bylo dosaženo při úpravě pouze magnetů NdFeB30. Hodnota otáček se pohybovala na  $2285 \text{ min}^{-1}$ . Původní model stejnosměrného motorku dosahoval na hodnotu otáček naprázdno  $2505 \text{ min}^{-1}$ .

Při úpravě motorku na permanentní magnety ze vzácných zemin tedy došlo k výraznější změně konstanty motoru. Konstanta motoru vzrostla při úpravě na permanentní magnety NdFeB30.



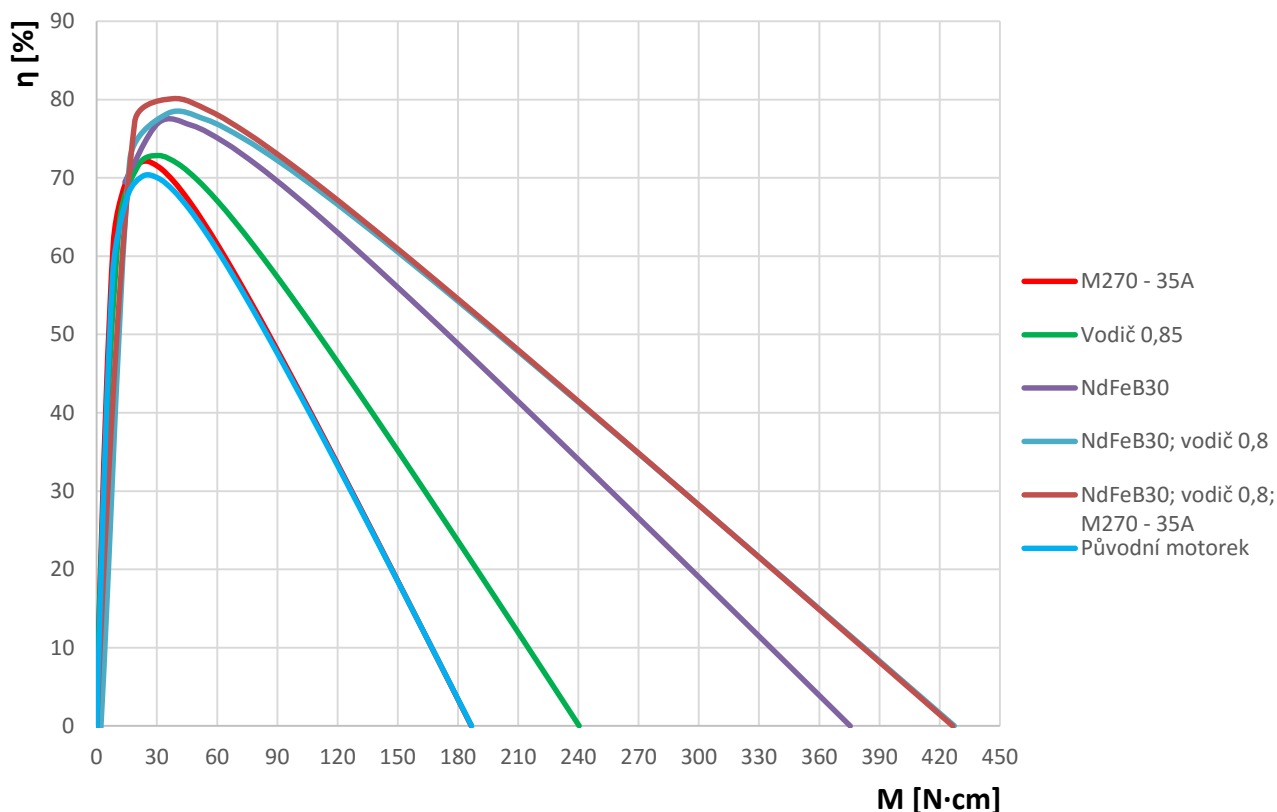
Obrázek 22 Výkonové charakteristiky úprav motorku

Výsledné výkonové charakteristiky při provedených úpravách modelu stejnosměrného motorku Atas P2TV porovnaných oproti původnímu modelu motorku. Vynesené charakteristiky se překrývají a to ve dvou případech úprav. První u charakteristiky původního motorku a změny materiálu rotorových plechů na elektrotechnickou ocel M270 – 35A. Druhý případ překrytu vznikl u úprav permanentních magnetů NdFeB30 s vodičem o průměru jádra 0,8 mm a úpravy navíc ještě doplněné o změněnou elektrotechnickou ocel rotorových plechů na M270 – 35A. U výkonových charakteristik se podařilo s každou úpravou zvýšit výkon stejnosměrného motorku. Na jmenovité hodnotě  $2\,000\text{ min}^{-1}$  došlo ke zvýšení výkonu motorku od jednotek až po desítky wattů.

Nejvyššího maximálního výkonu bylo dosaženo při úpravě poslední. Tedy permanentní magnety ze vzácných zemin NdFeB30, vodič s průměrem jádra 0,8 mm a rotorové plechy z oceli M270 – 35A. Maximální hodnota výkonu byla 257,22 W.

Nejvyššího výkonu při jmenovitých otáčkách  $2\,000\text{ min}^{-1}$  dosáhla také úprava s permanentními magnety NdFeB30, vodič s průměrem jádra 0,8 mm a rotorovými plechy z elektrotechnické oceli M270 – 35A, při této úpravě bylo dosaženo jmenovitého výkonu 117,44 W.

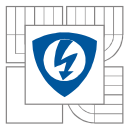
Při nejjednodušší úpravě tedy výměně materiálu oceli rotorových plechů bylo dosaženo zlepšení na jmenovité hodnotě otáček  $2\,000\text{ min}^{-1}$  o 1 W.



Obrázek 23 Srovnání jednotlivých účinností při úpravách stejnosměrného motorku

Charakteristiky účinností pro vybrané úpravy stejnosměrného motorku a vztažené k původnímu stejnosměrnému motorku respektive jeho vytvořenému modelu v RMxpert. U všech uvedených úprav bylo dodrženo zlepšení účinnosti na jmenovité hodnotě otáček  $2\,000\text{ min}^{-1}$ . Tedy všechny úpravy dosahovaly i vyšší nejlepší dosažitelné účinnosti, než tomu bylo u původního modelu stejnosměrného motorku.

Nejlepší dosažené účinnosti na jmenovitých otáčkách  $2\,000\text{ min}^{-1}$  tak i nejvyšší možné byl při úpravě poslední, která byla změna permanentních magnetů na NdFeB30, průměr jádra vodiče na 0,8 mm a rotorové plechy z oceli M270 – 35A. Při této úpravě bylo dosaženo 78,57 % při  $2\,000\text{ min}^{-1}$  a nejvyšší dosažená účinnost byla 80,11 %. Oproti původnímu modelu motorku došlo k nárůstu účinnosti při této nejlepší variantě účinnosti na jmenovitých otáčkách o 10 %. Model stejnosměrného motorku bez úprav dosahoval účinnosti 68,42 %.



## 7.7 Shrnutí úprav

Na začátek je třeba říci, že se jedná o teoretické možnosti úprav. Reálné možnosti úpravy by se mohli lišit. Hodnoty byly porovnány jen vzájemně v programu Ansoft Maxwell, který je spočítal v projektu RMxpřt. Tyto hodnoty byly pak graficky srovnány pro vizuální ukázkou reakce motoru na danou změnu.

V případě úprav na permanentní magnety ze vzácných zemin NdFeB30 byly uvažovány s tloušťkou 2 mm. Tato malá výška magnetu byla zvolena s ohledem na jejich sílu, samotnou velikost motorku a také velmi důležitou jejich vysokou cenu. Tedy, aby případné nároky na cenu nebyly tak velké je lepší použít méně tohoto materiálu, myšleno tloušťkou magnetu.

Důležitý parametr při určení zda došlo při úpravě, ke zlepšení modelu stejnosměrného motorku, byly otáčky motoru  $2\,000\text{ min}^{-1}$  a k nim vztažené jednotlivé vynesené parametry stroje.

Jako nejlepší možnou úpravu ze všech uvedených a vypracovaných bych zvolil poslední možnou. Upravené permanentní magnety na magnety ze vzácných zemin a to NdFeB30, vinutí rotoru vodičem s průměrem jádra 0,8 mm a elektrickou ocelí na rotorové plechy M270 – 35A. Tato úprava dosahovala nejlepších hodnot porovnávaných parametrů, především dosáhla nejvyšší účinnosti a to 78,57 % při  $2\,000\text{ min}^{-1}$ .

Tabulka 10 Přehled parametrů naprázdno u jednotlivých úprav

| Naprázdno                         |                        |       |          |       |       |
|-----------------------------------|------------------------|-------|----------|-------|-------|
| Model motorku                     | n [min <sup>-1</sup> ] | I [A] | M [N·cm] | P [W] | η [%] |
| Původní motorek                   | 2 505                  | 0,54  | 0        | 0     | 0     |
| M270 - 35A                        | 2 510                  | 0,46  | 0        | 0     | 0     |
| Vodič 0,8 mm                      | 2 518                  | 0,54  | 0        | 0     | 0     |
| NdFeB30                           | 2 285                  | 0,46  | 0        | 0     | 0     |
| NdFeB30; vodič 0,8 mm             | 2 288                  | 0,46  | 0        | 0     | 0     |
| NdFeB30; vodič 0,8 mm; M270 - 35A | 2 301                  | 0,37  | 0        | 0     | 0     |

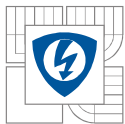
Tabulka 11 Přehled parametrů nakrátko u jednotlivých úprav

| Nakrátko                          |                        |       |          |       |       |
|-----------------------------------|------------------------|-------|----------|-------|-------|
| Model motorku                     | n [min <sup>-1</sup> ] | I [A] | M [N·cm] | P [W] | η [%] |
| Původní motorek                   | 0                      | 22,10 | 186,87   | 0     | 0     |
| M270 - 35A                        | 0                      | 21,90 | 186,64   | 0     | 0     |
| Vodič 0,8 mm                      | 0                      | 28,27 | 240,42   | 0     | 0     |
| NdFeB30                           | 0                      | 39,68 | 375,39   | 0     | 0     |
| NdFeB30; vodič 0,8 mm             | 0                      | 45,15 | 427,34   | 0     | 0     |
| NdFeB30; vodič 0,8 mm; M270 - 35A | 0                      | 45,15 | 426,44   | 0     | 0     |

Tabulka 12 Přehled parametrů na jmenovité hodnotě

| Jmenovité hodnoty                 |                        |       |          |        |       |
|-----------------------------------|------------------------|-------|----------|--------|-------|
| Model motorku                     | n [min <sup>-1</sup> ] | I [A] | M [N·cm] | P [W]  | η [%] |
| Původní motorek                   | 2 000                  | 4,86  | 38,14    | 79,86  | 68,42 |
| M270 - 35A                        | 2 000                  | 4,82  | 38,42    | 80,44  | 69,55 |
| Vodič 0,8 mm                      | 2 000                  | 6,25  | 49,97    | 104,61 | 69,79 |
| NdFeB30                           | 2 000                  | 5,35  | 47,05    | 98,47  | 76,73 |
| NdFeB30; vodič 0,8 mm             | 2 000                  | 6,09  | 54,05    | 113,11 | 77,48 |
| NdFeB30; vodič 0,8 mm; M270 - 35A | 2 000                  | 6,23  | 56,12    | 117,44 | 78,57 |





## 8 ZÁVĚR

V úvodu práce byl zpracován přehled stejnosměrných motorků. Motorčky byly vybírány dle podobných parametrů na srovnání a typů provozu. Takto vypracovaný přehled stejnosměrných motorků byl z vytvořených tabulek pro jednotlivé parametry stejnosměrných motorků použit pro grafické srovnání.

Srovnávacími parametry u všech vybíraných stejnosměrných motorků bylo jmenovité napětí 24 V, jmenovitý proud, jmenovitý výkon, u kterého byla hranice 200 W, do které byly stejnosměrné motorčky vybírány tak, aby ji nepřekročily. Posledním parametrem byly jmenovité otáčky. Dalším nepřímo srovnávaným údajem bylo, v jakém provozu stejnosměrný motorek pracuje, všechny vybrané motorčky pracují v provozu S1. Provoz S1 označuje kontinuální provoz. Také typ krytí byl údaj, dle kterého bylo řízeno vybírání stejnosměrných motorků. Vybrané stejnosměrné motorčky měly uzavřené krytí.

Z takto vypracovaného přehledu stejnosměrných motorků bylo za úkol vybrat jeden stejnosměrný motorek k podrobnému rozboru a popisu. Jako zvolený stejnosměrný motorek z přehledu byl P2TV od výrobce ATAS elektromotory, Náchod s.r.o. Ke zvolenému stejnosměrnému motorku byla za pomoci vedoucího p. prof. Hájka vyžádána podrobná výkresová dokumentace.

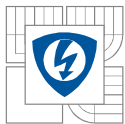
Všechny získané výkresové dokumentace a technické protokoly byly použity k vytvoření modelu stejnosměrného motorku P2TV v programu Ansoft Maxwell. V programu Ansoft Maxwell byl vybrán na zpracování projekt v RMxprt Design (Permanent Magnet DC Motor). Pro potřebu vytváření dalších úprav bylo nejdůležitější, aby motorek po vytvoření jako modelu dosahoval stejných jmenovitých hodnot a parametrů jako reálný stejnosměrný motorek P2TV. Po vytvoření modelu byla práce zaměřena na testování chování modelu na uvedené možnosti inovací.

Stejnýsměrný motorek P2TV byl již vyráběn s kostrou motorku z bezešvé trubky, činitel plnění zde byl 1, protože má ideální kruhový tvar, stejně jako lepené permanentní magnety, které mají tak ideální kruhový tvar. Nevzniká tedy parazitní vzduchová mezera.

Jako první úprava stejnosměrného motorku byla zvolena elektrická ocel M270 – 35A místo původní oceli použité na rotorové plechy M700 – 50A. Při této změně bylo nutné přepočíst počet plechů na délku 60 mm, což byla původní délka rotoru. Bylo použito 174 plechů, tedy délka rotoru byla změněna na 60,9 mm. Při této změně došlo jen k velice nepatrnému zlepšení motorku výkon se zvedl o 1 W, účinnost přibližně o 1,1 % a proud klesl o 0,6 A při momentu 38,42 N·cm.

V úpravě číslo dvě byl zvětšen průměr jádra vodiče vinutí kotvy. Byl zvětšen z 0,75 mm na 0,85 mm. Tímto se nám i zlepšil činitel plnění drážky z 0,34 na 0,39. Touto úpravou se nám zvedl proud o 2 A, moment se zvětšil o 11,2 N·cm a výkon narostl o 25 W. Účinnost byla oproti původnímu modelu motorku vyšší o 1,3 %.

Jako třetí úpravou stejnosměrného modelu motorku byla zvolena výměna feritových permanentních magnetů za permanentní magnety ze vzácných zemin NdFeB30. Tato úprava sebou přinesla řadu změn na statoru i na rotoru. Na statoru došlo ke snížení výšky magnetu na 2 mm a zvětšení vnitřního poloměru o 1 mm. Rotor byl zvětšen na vnějším průměru o 1 mm, počet rotorových drážek byl snížen na 12, počet vodičů na drážku byl snížen na 22 a to v důsledku

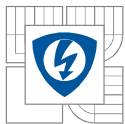


změny rozměrů drážky kdy došlo k jejímu zúžení a zkrácení délky, aby nedocházelo k přesycování. Plocha nové drážky byla o  $17,28 \text{ mm}^2$  menší. Vodič vinutí zůstal původního průměru  $0,75 \text{ mm}$ . Při této úpravě bylo dosaženo na jmenovitých otáčkách  $2000 \text{ min}^{-1}$  proudu  $5,35 \text{ A}$ , momentu  $47,05 \text{ N}\cdot\text{cm}$ , výkon vyšší o  $19 \text{ W}$ , a účinnost byla znatelně vyšší než u předchozích úprav a to  $76,73 \%$  tedy o  $8 \%$  vyšší než tomu bylo u původního motorku při stejných otáčkách.

Další varianta úpravy byla udělána způsobem z předešlé úpravy, ale byl k ní přidán upravený vodič vinutí zvýšený na  $0,8 \text{ mm}$  průměru jádra. Tato varianta byla ještě o  $0,8 \%$  v účinnosti lepší zvýšený proud na  $6,09 \text{ A}$  byl za cenu podstatně vyššího momentu a výkonu na jmenovitých otáčkách a to  $54,05 \text{ N}\cdot\text{cm}$  a  $113,11 \text{ W}$ .

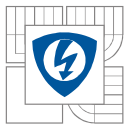
Jako poslední úprava byl vzat model stejnosměrného motorku z předešlé úpravy a k němu přidána úprava materiálu rotorových plechů na ocel M270 – 35A. Inovace motorku v této podobě se ukázala jako nejlepší z vybraných bráno z pohledu velikosti dosažené účinnosti. Při proudu  $6,23 \text{ A}$  měl motorek, moment  $56,12 \text{ N}\cdot\text{cm}$ , výkon  $117,44 \text{ W}$  a již zmíněnou účinnost  $78,57 \%$ .

Uváděné měření motorku dle možnosti nemohlo být provedeno z důvodu, že výrobce ATAS elektromotory, Náchod má velice přetíženou výrobu a tedy by nebylo možné domluvit kusovou výrobu na úpravu stejnosměrného motorku P2TV pro bakalářskou práci.



## LITERATURA

- [1] ATAS elektromotory Náchod a.s. *Komutátorové motory: S permanentními magnety* [online]. 2009 [cit. 2016-01-03]. Dostupné z: <http://www.atas.cz/>
- [2] Bühler elektromotoren Německo GmbH. *Product Overview* [online]. 2012 [cit. 2016-01-03]. Dostupné z: [http://www.buehlermotor.com/EN/Products?open&at\\_query=\\*&at\\_par=sf=3;ccat=1](http://www.buehlermotor.com/EN/Products?open&at_query=*&at_par=sf=3;ccat=1)
- [3] Engel elektromotoren Německo GmbH. *Products: GNM series 4175A* [online]. 2011 [cit. 2016-01-03]. Dostupné z: <http://www.engel-elektromotoren.de/us/produkte/gnm/gnm-4175a/>
- [4] Dunker elektromotoren Německo GmbH. *Ametek: precision motion control* [online]. 2015 [cit. 2016-01-03]. Dostupné z: <http://www.dunkermotoren.com/default.asp?id=9&mid=15&lang=8>
- [5] BOSCH elektromotoren Německo GmbH. *Products: DC motors without transmission* [online]. [cit. 2016-01-03]. Dostupné z: <http://www.bosch-ibusiness.com/boaaelmoocs/category/CPB/151>
- [6] Nm: Nerezové materiály. *Bezešvé trubky* [online]. [cit. 2016-01-03]. Dostupné z: <http://www.nerezove-materialy.cz/produkty/trubky/bezesve-trubky?gclid=CM6CmemWhMoCFaofwwodYAAB0g>
- [7] MAGNET-PRO. *Magnety NdFeB* [online]. 2014 [cit. 2016-01-03]. Dostupné z: <http://www.magnet-pro.cz/magnety-neodmytove-ndfbe.html>
- [8] ATAS elektromotory Náchod a.s.: *dokumentace od výrobce*.
- [9] PZK: International cooperations. *Samáriové magnety* [online]. 2008, 2016 [cit. 2016-01-03]. Dostupné z: <http://www.pzk.cz/cz/samariove-magnety>
- [10] *Elektrické stroje: Stejnoseměrné stroje* [online]. FEKT VUT v Brně, s. 111 [cit. 2016-01-03]. Dostupné z: [https://www.feec.vutbr.cz/et/skripta/uvee/Elektricke\\_stroje\\_L.pdf](https://www.feec.vutbr.cz/et/skripta/uvee/Elektricke_stroje_L.pdf)
- [11] Pohonnatechnika.cz. *Pohonnatechnika.cz: Druhy provozu* [online]. 2007, 2016 [cit. 2016-01-04]. Dostupné z: <http://www.pohonnatechnika.cz/frekvencni-menice/druhy-provozu>
- [12] VRÁNA, Václav. *Elektrické stroje*. VŠB-TU Ostrava, 2004, s. 11.
- [13] Cebes a.s. [online]. [cit. 2016-01-04]. Dostupné z: <http://www.cebes.cz/lisovane-komutatory/>
- [14] HÁJEK, Vítězslav a Čestmír ONDRŮŠEK. *Metody zvýšení účinností a optimalizace automobilových elektrických strolů*. Brno, 2000.



- [15] *Cogent: A Tata Steel Enterprise* [online]. [cit. 2016-05-26]. Dostupné z: <http://cogent-power.com/downloads>
- [16] GOTTWALD, M. *Dynamický model stejnosměrného motoru s využitím metody konečných prvků*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2011. 69 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Ondřej Vítek, Ph.D..
- [17] GIERAS, Jacek F., WANG, Rong-Jie a KAMPER, Maarten J.. *Axial Flux Permanent Magnet Brushless machines*. 2nd edition. vyd. Springer Science & Business Media, 2008. 362 s. ISBN 978-1-4020-6993-2
- [18] BÁRTA, J. *Výpočet synchronizovaného asynchronního motoru*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2012. 55 s. Vedoucí bakalářské práce doc. Ing. Čestmír Ondrůšek, CSc..



## **PŘÍLOHY**